

Zadání bakalářské práce

Student: **Michal Viszczor**

Studijní program: B2109 Metalurgické inženýrství

Studijní obor: 3904R020 Tepelná technika a životní prostředí

Téma: Porovnání energetických a ekologických parametrů žíhacích pecí
Comparison of Energetical and Environmental Parametres of Annealing
Furnaces

Zásady pro vypracování:

1. Žíhání-materiálová, energetická a emisní analýza
2. Technické parametry žíhacích pecí
3. Tepelná bilance a tepelná práce pecí
4. Emise a vliv provozu pecí na životní prostředí
5. Vyhodnocení a závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

1. CARVALHO, M. Combustion Technologies for a Clean Environment, Godon and Breach, Abingdon, 2004. 560 p. ISBN 2-88124-619-2.
2. SAMUELSEN, G. S. Energy, Combustion and the Environment, Irvine, 2005. ISSN 1073-7804.
3. KREMER, R., OBROUČKA, K. Ohřev kovů. Praha: SNTL, 1974. 422 s.
4. KADRNOŽKA, J. Energie a globální oteplování. Brno: VUTIUM, 2006. 190 s. ISBN 80-214-2919-4.

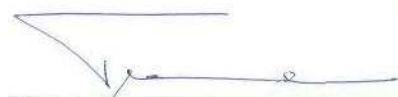
Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Zdeněk Toman, CSc.**

Konzultant bakalářské práce: Ing. Josef Audy

Datum zadání: 30.11.2010

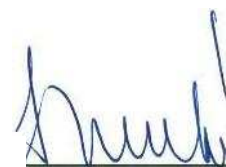
Datum odevzdání: 29.04.2011



prof. Ing. Miroslav Příhoda, CSc.
CSc.Dr.h.c.



prof. Ing. Ludovít Dobrovský,



Zásady pro vypracování bakalářské práce

I.

Bakalářskou prací (dále jen BP) se ověřují vědomosti a dovednosti, které student získal během studia, a jeho schopnosti využívat je při řešení teoretických i praktických problémů.

II.

Uspořádání bakalářské práce:

- | | |
|--|------------------------------|
| 1. Titulní list | 5. Obsah BP |
| 2. Zásady pro vypracování BP | 6. Textová část BP |
| 3. Prohlášení + místopřísežné prohlášení | 7. Seznam použité literatury |
| 4. Abstrakt + klíčová slova česky a anglicky | 8. Přílohy |

ad 1) Titulním listem je originál zadání BP, který student obdrží na své oborové katedře.

ad 2) Tyto „Zásady pro vypracování bakalářské práce“ následují za titulním listem.

ad 3) Prohlášení + místopřísežné prohlášení napsané na zvláštním listě (student jej obdrží na své oborové katedře) a vlastnoručně podepsané studentem s uvedením data odevzdání BP. *V případě, že BP vychází ze spolupráce s jinými právníckými a fyzickými osobami a obsahuje citlivé údaje, je na zvláštním listě vloženo prohlášení spolupracující právnícké nebo fyzické osoby o souhlasu se zveřejněním BP.*

ad 4) Abstrakt a klíčová slova jsou uvedena na zvláštním listě česky a anglicky v rozsahu max. 1 strany pro obě jazykové verze.

ad 5) Obsah BP se uvádí na zvláštním listě. Zahnuje názvy všech očíslovaných kapitol, podkapitol a statí textové části BP, odkaz na seznam příloh a seznam použité literatury, s uvedením příslušné stránky. Předpokládá se desetinné číslování.

ad 6) Textová část BP obvykle zahrnuje:

- Úvod, obsahující charakteristiku řešeného problému a cíle jeho řešení v souladu se zadáním BP;
- Vlastní rozpracování BP (včetně obrázků, tabulek, výpočtů) s dílčími závěry, vhodně členěné do kapitol a podkapitol podle povahy problému;
- Závěr, obsahující celkové hodnocení výsledků BP z hlediska stanoveného zadání.

BP nemusí obsahovat experimentální (aplikační) část.

BP bude zpracována v rozsahu min. 25 stran (včetně obsahu a seznamu použité literatury).

Text musí být napsán vhodným textovým editorem počítače po jedné straně bílého nelesklého papíru formátu A4 při respektování následující **doporučené** úpravy - písmo Times New Roman (nebo podobné) 12b; řádkování 1,5; okraje – horní, dolní – 2,5 cm, levý – 3 cm, pravý 2 cm. Fotografie, schémata, obrázky, tabulky musí být očíslovány a musí na ně být v textu poukázáno. Budou zařazeny průběžně v textu, pouze je-li to nezbytně nutné, jako přílohy (viz ad 8).

Odborná terminologie práce musí odpovídat platným normám. Všechny výpočty musí být přehledně uspořádány tak, aby každý odborník byl schopen přezkoušet jejich správnost.

U vzorců, údajů a hodnot převzatých z odborné literatury nebo z praxe musí být uveden jejich pramen - u literatury citován číselným odkazem (v hranatých závorkách) na seznam použité literatury.

Nedostatky ve způsobu vyjadřování, nedostatky gramatické, neopravené chyby v textu mohou snížit klasifikaci práce.

ad 7) BP bude obsahovat alespoň 10 literárních odkazů, z toho nejméně 3 v některém ze světových jazyků.

Seznam použité literatury se píše na zvláštním listě. **Citaci literatury je nutno uvádět důsledně v souladu s ČSN ISO 690.** Na práce uvedené v seznamu použité literatury musí být uveden odkaz v textu BP.

ad 8) Přílohy budou obsahovat jen ty části (speciální výpočty, zdrojové texty programů aj.), které nelze vhodně včlenit do vlastní textové části, např. z důvodu ztráty srozumitelnosti.

III.

Bakalářskou práci student odevzdá ve dvou knihařsky svázaných vyhotoveních, pokud katedra garantující studijní obor neurčí jiný počet. Vnější desky budou označeny takto:

nahoře: *Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava*
Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství
Katedra

uprostřed: *BAKALÁŘSKÁ PRÁCE*

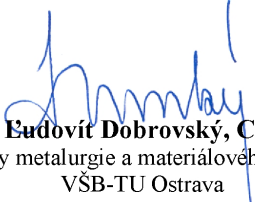
dole: *Rok* *Jméno a příjmení*

Kromě těchto dvou knihařsky svázaných výtisků odevzdá student kompletní práci také v elektronické formě do IS EDISON včetně abstraktu a klíčových slov v češtině a angličtině.

IV.

Bakalářská práce, která neodpovídá těmto zásadám, nemůže být přijata k obhajobě. Tyto zásady jsou závazné pro studenty všech studijních programů a forem bakalářského studia fakulty metalurgie a materiálového inženýrství Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava od akademického roku 2009/2010.

Ostrava 30. 11. 2010


Prof. Ing. Eudovít Dobrovský, CSc., Dr.h.c.
děkan fakulty metalurgie a materiálového inženýrství
VŠB-TU Ostrava

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- jsem byl(a) seznámen(a) s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména §35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního (§60 - školní dílo);
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB - TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§35 odst. 3);
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude archivována v elektronické formě v databázi Ústřední knihovny VŠB - TUO a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO;
- bylo sjednáno, že s VŠB - TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona;
- bylo sjednáno, že užít své dílo - bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB - TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB - TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že odevzdáním své bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (Zákon o vysokých školách) bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Místopřísežně prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci vypracoval(a) samostatně.

V Ostravě 29. 4. 2011

.....
podpis (jméno a příjmení studenta)

Abstrakt

Tato bakalářská práce porovnává energetické a ekologické parametry žíhacích pecí používaných zejména pro tepelné zpracování oceli. V obsahu jsou shrnuty jednotlivé postupy žíhání, pomocí nichž se dosahuje požadované změny vlastností oceli. Další kapitoly popisují jednotlivé typy žíhacích pecí a jejich vliv na životní prostředí. Podrobněji se práce věnuje výpočtu tepelné bilance a tepelné práce žíhací pece podle zadaných parametrů. V závěru je uvedeno zhodnocení a porovnání jednotlivých pecí.

Klíčová slova

tepelné zpracování, žíhání, žíhací pece, ochranná atmosféra, tepelná bilance, životní prostředí, emise,

Abstract

This bachelor thesis compares energetic and ecological characteristics annealing furnaces used especially for heat-treating steels process. In content there are individual annealing routes lumped, helping that are required feature changes of steels achieved. Next chaps describe single types of annealing furnaces and their environmental impact. The work applies to heat balance calculation in more detail and annealing furnace heat work according to engaged parameters. Estimation and comparison single furnaces are mentioned at the end.

Key words

heat-treating process, annealing, annealing furnace, protecting atmosphere, heat balance, environment, emissions,

Seznam použitých veličin

Název	Značka	Jednotka
opal materiálu	a	%
šířka	b	m
spotřeba paliva	B	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
měrná tepelná kapacita	c	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ $\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$
množství vsazovaného kovu	G	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
entalpie	i	$\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}$ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
hmotnost	m	kg
obsah nespálených plynů	n	%
teplo	Q	J
výhřevnost paliva	Q_n	W $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}$ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
obsah plochy	S	m^2
Celsiova teplota	t	°C
rozdíl teplot	Δt	°C
termodynamická teplota	T	K
objem	V	m^3
součinitel přestupu tepla konvekcí	α_k	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
účinnost	η	1
součinitel tepelné vodivosti	λ	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
hustota	ρ	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
čas, doba	τ	s
součinitel zaclonění	\varnothing	1
množství okují	Ψ	1.38

1	ÚVOD.....	1
2	ŽÍHÁNÍ – MATERIÁLOVÁ, ENERGETICKÁ A EMISNÍ ANALÝZA	2
2.1	Materiálová analýza.....	2
2.1.1	Rovnovážný diagram železo - uhlík	3
2.1.2	Žíhání základní	4
2.1.3	Homogenizační žíhání	5
2.1.4	Normalizační žíhání.....	5
2.1.5	Žíhání naměkko	5
2.1.6	Žíhání na odstranění pnutí	6
2.1.7	Žíhání rekrytalizační	6
2.1.8	Protivločkové žíhání	6
2.1.9	Žíhání pro odstranění křehkosti po moření	6
2.2	Energetická analýza	6
2.2.1	Povrch žíhaného materiálu	6
2.2.2	Působení plynů na povrch kovů	7
2.2.2.1	Oxidace oceli	7
2.2.2.2	Oduhličení a nauhličení oceli	7
2.2.3	Ochranné atmosféry.....	8
2.2.3.1	Exotermické atmosféry.....	9
2.2.3.2	Endotermické atmosféry.....	9
2.2.3.3	Dusík.....	9
2.2.3.4	Štěpený čpavek	9
2.2.3.5	Vodík	9
2.2.3.6	Inertní atmosféry.....	9
2.2.3.7	Vakuum jako ochranná atmosféra	10
2.3	Emisní analýza.....	10
2.3.1	Měření emisí.....	10
2.3.2	Analýzátory plynů a spalin	10
3	TECHNICKÉ PARAMETRY ŽÍHACÍCH PECÍ.....	12
3.1	Komorové žíhací pece	12
3.1.1	Konstrukce komorových pecí.....	13
3.1.2	Vyzdívka komorových pecí.....	13
3.1.3	Topný systém komorových pecí.....	14
3.1.4	Vsázka komorových pecí.....	15
3.2	Poklokové žíhací pece	15
3.2.1	Konstrukce pokloповých pecí	15
3.2.2	Vyzdívka pokloповých pecí	16
3.2.3	Topný systém pokloповých pecí	16
3.2.4	Vsázka pokloповých pecí	18
3.3	Průběžné žíhací pece	18
3.3.1	Konstrukce průběžných pecí	19
3.3.2	Topný systém průběžných pecí	19
3.3.3	Vsázka průběžných pecí	20
4	TEPELNÁ BILANCE A TEPELNÁ PRÁCE PECÍ.....	21
4.1	Tepelné bilance pecí	21
4.1.1	Chemické teplo paliva	22
4.1.2	Teplo předehřátého vzduchu	22
4.1.3	Teplo předehřátého paliva	22
4.1.4	Teplo exotermických reakcí	22
4.1.5	Užitečné teplo potřebné k ohřevu kovu.....	23

4.1.6	Ztráty tepla spaliny	23
4.1.7	Ztráty tepla nedokonalostí hoření	23
4.1.8	Ztráty tepla pracovního prostoru pece	24
4.1.8.1	Ztráty tepla zdíve	24
4.1.8.2	Ztráty tepla dveřmi, okny a šterbinami	26
4.1.8.3	Ztráty tepla chladící vodou	26
4.1.8.4	Ztráty tepla ohřevem pohybujících se částí	26
4.1.9	Ztráty tepla okujemi	27
4.1.10	Ztráty zbývající	27
4.2	Tepelná práce pecí	27
4.2.1	Ukazatele charakterizující tepelnou práci	27
4.2.2	Účinnosti pece	28
4.3	Sestavení tepelné bilance žíhací vozové pece	29
4.3.1	Ukazatele charakterizující tepelnou práci žíhací pece	29
4.3.2	Výpočet jednotlivých položek tepelné bilance žíhací pece	29
4.3.3	Tepelná bilance pracovního prostoru žíhací pece	30
4.3.4	Účinnosti žíhací pece	31
5	EMISE A VLIV PROVOZU PECÍ NA ŽIVOTNÍ PROSTŘEDÍ	32
5.1	Tuhé a kapalné znečišťující látky	32
5.2	Plynné znečišťující látky	33
5.2.1	Sloučeniny síry	33
5.2.2	Sloučeniny dusíku	33
5.2.3	Sloučeniny uhlíku	35
5.2.4	Polycyklické aromatické uhlovodíky (PAU)	35
5.3	Limity znečišťování ovzduší	35
5.3.1	Emisní limity	36
5.3.2	Imisní limity	36
5.3.3	Depoziční limity	36
6	ZÁVĚR	37
	Seznam použité literatury	38
	Seznam obrázků	39

1 ÚVOD

Ocel si již přes 300 let stále udržuje postavení základního konstrukčního a hromadně vyráběného materiálu. Tento materiál je úzce spjat s technickým pokrokem a s trvalým vylepšováním životních podmínek. Vlastnosti ocelí jsou závislé na chemickém složení a také na vnitřní struktuře. Požadované struktury se u ocelí dosahuje vhodným tepelným zpracováním. Tepelné zpracování zahrnuje postupy, při nichž se vnitřní stavba kovu mění pomocí teploty. Mezi významné způsoby tepelného zpracování patří procesy žíhání, jež se vyznačují velmi malou rychlostí změn teploty. Jednotlivé procesy žíhání se využívají především jako mezioperační žíhání, a proto se obvykle těmito postupy nedosahuje užitečných vlastností materiálu.

Ohřev žíhaného materiálu probíhá v žíhacích pecích. Vzhledem k účelu žíhání a druhu žíhaného materiálu existuje mnoho typů žíhacích pecí. Mezi nejpoužívanější patří zejména pece komorové, poklopové a průběžné. Pece se vytápějí buď plamenem (palivové), kdy se tepelná energie získává spalováním pevného, kapalného či plynného paliva, nebo elektricky, kde teplo vzniká přeměnou z elektrické energie. Podle způsobu využití tepla odpadních spalin se dělí na pece rekuperativní a pece regenerativní. Při žíhání má významný vliv pecní atmosféra, která působí na povrch materiálu. Toto působení pecních plynů mívá většinou nežádoucí účinky na povrchovou kvalitu. Aby se tomu zabránilo, vhání se do pracovního prostoru pece tzv. ochranná atmosféra, která materiál chrání po celou dobu ohřevu. Pro tuto technologii je však nutno vybavit pec vyvíječem ochranné atmosféry. Způsoby chlazení materiálu jsou různé a záleží zejména na typu pece a charakteru tepelného zpracování.

Spotřeba tepla v pecích má významný vliv na celkovou spotřebu energie v hutních závodech. K posouzení tepelné práce pecí a tím i možnosti snížení spotřeby tepla slouží tepelné bilance průmyslových pecí. Tepelné bilance jsou ve své podstatě energetické bilance umožňující nejen určit u nově projektovaných pecí jejich průměrnou spotřebu paliva, ale i porovnávat hospodárnost dané technologie. Vzhledem k tomu, že charakter tepelné práce jednotlivých pecí je různý, je nutno této skutečnosti přizpůsobit i provedení a sestavení tepelné bilance. Řešení tepelné bilance pecí pracujících nepřetržitě je rozdílné než u pecí pracujících přerušovaně. Tepelná bilance může být sestavena buď pro celé zařízení, nebo jen pro jeho určitou část. Tepelná práce pecí je charakterizována zejména spotřebou paliva, výkonem pece a účinnostmi.

Plamenné pece vytápěné spalováním paliva produkují nezanedbatelné množství nejrozumnějších druhů látek, které mají negativní vliv na životní prostředí. Tyto látky nazývané emise jsou vypouštěny do ovzduší, kde se rozptylují, přenášejí, chemicky a fyzikálně přeměňují a nakonec většinou škodlivě působí na lidi, ekosystémy a neživé věci. Přípustnou úroveň znečišťování ovzduší určují hodnoty emisních limitů pro jednotlivé znečišťující látky. K definování škodlivosti nebo nebezpečnosti různých znečišťujících látek slouží imisní limity, jimiž jsou obvykle nejvyšší přípustné koncentrace. Množství spadu prachu vyjadřují depoziční limity. Pece vytápěné elektricky na životní prostředí negativní vliv nemají.

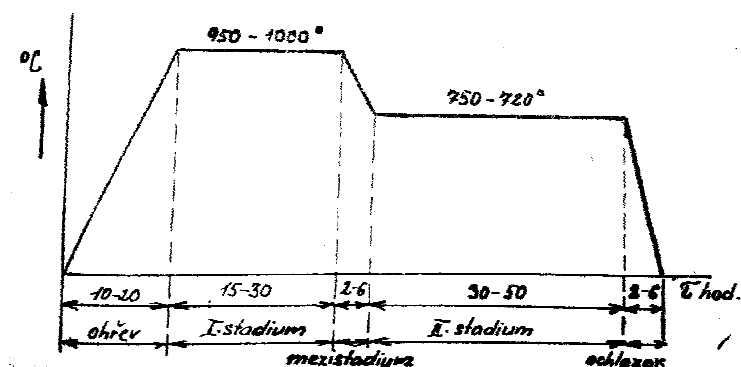
2 ŽÍHÁNÍ – MATERIÁLOVÁ, ENERGETICKÁ A EMISNÍ ANALÝZA

Vlastnosti oceli jsou závislé nejen na chemickém složení, ale především na struktuře – tj. na fázovém složení a na tvaru a uspořádání jednotlivých fází. Požadované struktury se dosahuje u ocelí vhodného chemického složení tepelným zpracováním. Tepelné zpracování zahrnuje všechny postupy, při nichž se vnitřní stavba kovu záměrně mění pomocí změn teploty. Je-li struktura v nerovnovážném stavu, lze použít postupů směřujících k dosažení termodynamické rovnováhy, kterou představuje diagram Fe-Fe₃C. Tyto postupy se souhrnně označují jako žíhání.

Žíhání je jako způsob tepelného zpracování obecně definováno jako ohřev na zvolenou žíhací teplotu, výdrž na této teplotě nebo kolísání této teploty a další, zpravidla pomalé ochlazování na klidném nebo proudícím vzduchu [1]. Účel žíhání je různý, např. snížení tvrdosti, zlepšení obrobitelnosti, snížení vnitřních pnutí, dosažení žádoucí mikrostruktury atd. Žíhání je nejčastěji řízeno diagramem charakterizujícím danou žíhací technologii.

2.1 Materiálová analýza

Teplota, na kterou se materiál při žíhání ohřívá, doba, po kterou se na této teplotě udržuje, a rychlost, jakou se ochlazuje, závisí zejména na druhu materiálu a na účelu, jehož má být žíháním dosaženo. Mnohdy však je průběh žíhání mnohem složitější a skládá se pak z několikastupňového ohřevu, výdrže a ochlazování podle zadaného teplotního diagramu. Diagram zachycuje teplotu (t) v závislosti na čase (τ). Typický teplotní průběh žíhání uvádí obr. 1.



Obr. 1 Typický teplotní průběh při žíhání oceli

Účelem žíhání nejčastěji bývá:

- snížení pnutí
- snížení tvrdosti
- vyvolání vzniku struktur vhodných k obrábění nebo tváření za studena
- vyvolání vzniku struktur vhodných pro další tepelné zpracování
- odstranění nerovnoměrnosti struktury a její zjemnění
- vyrovnání rozdílů v chemickém složení (homogenizace)
- zotavení krystalické stavby

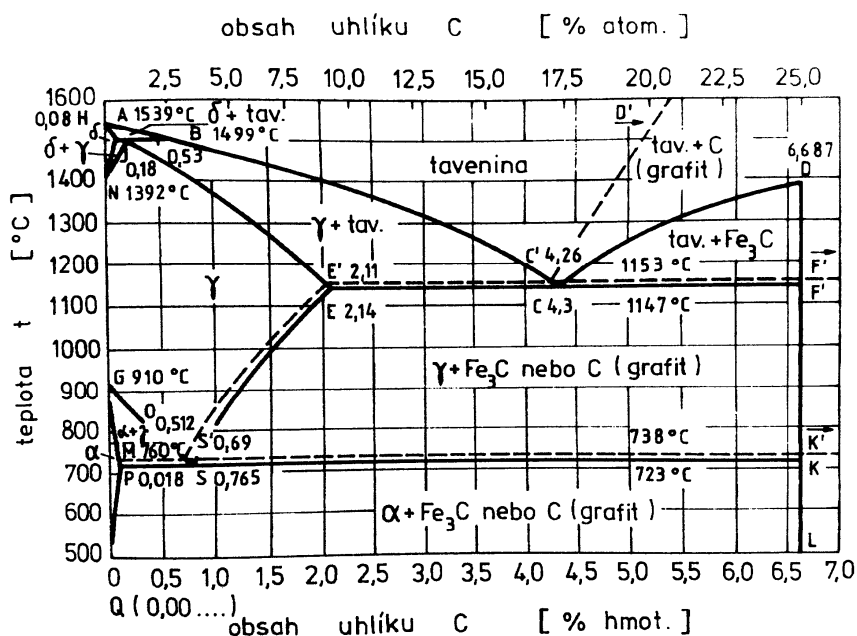
Podle žíhací teploty je možno všechny postupy žíhání rozdělit do dvou skupin na:

- žíhání bez překrystalizace
- žíhání s překrystalizací

2.1.1 Rovnovážný diagram železo - uhlík

Uhlík je nejdůležitější doprovodný prvek železa v oceli. Vyskytuje se ve všech ocelích a má význačný vliv na jejich vlastnosti. Jedním z jeho nejdůležitějších vlivů je působení na polohu bodů přeměny oceli. Objem oceli při ohřevu a ochlazování se mění nejen tepelnou dilatací, ale i vlivem fázových přeměn. Tyto objemové změny závisí na počtu atomů v elementární buňce mřížky jednotlivých modifikací železa (α a γ) a na velikosti těchto elementárních buněk.

Prvkem určujícím základní vlastnosti oceli je uhlík. V železe může být uhlík obsažen jako grafit nebo jako karbid železa Fe_3C , který má 6,67 % C. Stablní soustavu tvoří rovnovážný diagram železo – grafit, metastablní soustavu železo – karbid železa. Větší význam má metastablní soustava znázorněna na obr. 2 plnou čarou.



Obr. 2 Rovnovážný diagram železa a uhlíku

Strukturní složky slitin železo – uhlík jsou:

austenit – tuhý roztok uhlíku v železe γ , kromě uhlíku se v austenitu rozpouštějí i jiné legující prvky, austenit je nemagnetický, velmi houževnatý a tvárný,

cementit – karbid železa Fe_3C na křivce likvidu CD se vylučuje z taveniny primární cementit, na čáře ES z austenitu sekundární cementit a na čáře PQ z železa α terciální cementit, cementit je tvrdý, křehký a otěruvzdorný,

ledeburit – eutektikum se 4,3 % C se vylučuje v bodě C při teplotě 1147 $^{\circ}\text{C}$, v oblasti mezi 1147 a 723 $^{\circ}\text{C}$ se skládá ze směsi austenitu a cementitu o pod teplotou 723 $^{\circ}\text{C}$ z perlitu a cementitu,

ferit – železo α je téměř bez uhlíku, největší rozpustnost činí 0,024 % C, je měkký a tvárný a do teploty 768 °C magnetický, feritu a cementitu, tvrdost perlitu závisí na jeho tvaru, u lamelárního perlitu je tvrdost větší než u perlitu globulárního,

železo δ – obsahuje v rozmezí 1390 – 1534 °C nejvýše 0,1 % C, je nemagnetické, je to v podstatě železo α ,

Označení překrystalizačních teplot:

A – označení teplot přeměny,

Ac – označení teplot přeměny při ohřevu,

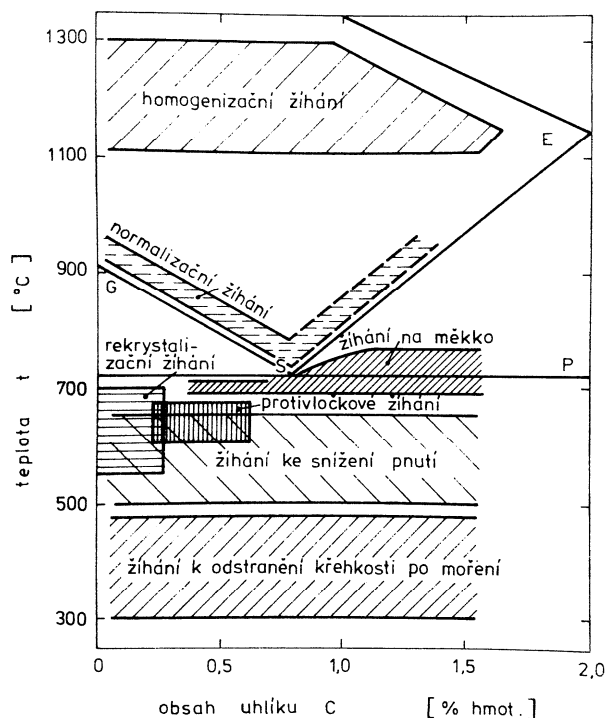
Ar – označení teplot přeměny při ochlazování,

A₁ – rovnovážná teplota perlitické přeměny (čára PSK),

A₂ – teplota, při níž ferit mění své feromagnetické vlastnosti (čára MO),

A₃ – teplota udávající horní hranici rovnovážné oblasti ferit – austenit (čára GOS),

Přehled teplotních oblastí, které odpovídají jednotlivým postupům žíhání, podává rovnovážný diagram na obr. 3.



Obr. 3 Oblasti žíhacích teplot v rovnovážném diagramu Fe - Fe₃C [2]

2.1.2 Žíhání základní

Účelem tohoto žíhání je zlepšit obrobitelnost a tvařitelnost oceli, snížit tvrdost a vnitřní pnutí. Po ohřevu oceli na teplotu 30 až 50 °C nad Ac₃ následuje výdrž na této teplotě a pomalé ochlazování v peci. Stav ocelí po tomto tepelném zpracování se v normách jakosti oceli označuje doplňkovou číslicí 2.

2.1.3 Homogenizační žíhání

Účelem homogenizačního žíhání je vyrovnat co nejvíce nestejnoměrnost chemického složení ocelí difuzí. Nestejnorodost chemického složení vzniká již při chladnutí odlité oceli mezi teplotami likvidu a solidu. Homogenizační žíhání jako samostatná operace je ohřev na teplotu značně vyšší, než je teplota bodu A_3 , tedy mezi teplotami 1000 – 1250 °C. Následuje dostatečně dlouhá výdrž na této teplotě (6 i více hodin) a pomalé ochlazování [3].

Delší výdrž na vysoké teplotě se však vytváří na povrchu oceli okuje a podpovrchové vrstvy se ochudí o uhlík (oduhličení). Proto je homogenizační žíhání správné jen tehdy, pokud je to nutné, jinak se musí značně zvětšit přídavky na opracování. V oceli tvářené probíhá difusní vyrovnání chemického složení mnohem rychleji.

2.1.4 Normalizační žíhání

Normalizační žíhání slouží k zjemnění hrubého zrna, které se může v oceli vytvořit již při lití nebo při tvářením za vysoké teploty. Hrubé zrno však může vzniknout i dlouhodobým žíháním za vysokých teplot. Doválcovací teplota, stupeň protváření a rychlost ochlazování po tvářením nejsou stejné u všech výrobků a často jsou různé i v různých částech jednoho výkovku. Proto mohou mít jednotlivé výrobky různě velké zrno a mohou se různě chovat při následném tepelném zpracování. Normalizačním žíháním se vytvoří nejen zrno jemnější, ale i stejnoměrně velké. V normách jakosti oceli se stav normalizačně žíhaný označuje doplňkovým číslem 1. Normalizační žíhání se však nepoužívá jen jako příprava pro následující kalení, ale i jako konečná operace tepelného zpracování méně namáhaných strojních součástí, zpravidla z uhlíkových ocelí. Aby se odstranilo vnitřní pnutí, snížila pevnost a zlepšily plastické vlastnosti oceli, tak se výrobek po normalizaci ještě žíhá (žíhání na pevnost) při teplotách 500 – 600 °C.

Zjemnění zrna při normalizaci je způsobeno překrystalizací a je proto tím větší, čím rychlejší byl ohřev a ochlazování. Pro normalizační žíhání jsou vhodné pece užívané ke kalení a žíhací pece s výjezdnou nístějí. Pro sériovou výrobu pak pece průběžné, zejména válečkové.

2.1.5 Žíhání naměkko

Žíháním na měkko se jednak sníží tvrdost pro následující obrábění nebo tvářením za studena, jednak se získá vhodných mechanických, fyzikálních a jiných vlastností. Nejjednodušším žíháním na měkko je ohřev na teplotu těsně pod bodem Ac_1 a několikahodinová výdrž na této teplotě [4]. Průběh žíhání lze poněkud urychlit kolísáním teploty okolo bodu A_1 . Při žíhání velkých kusů nebo velkých vsázek se však mění teplota jen na povrchu a uvnitř materiálu se změna teploty téměř neprojeví.

Při žíhání ve velkých komorových pecích je takřka nemožné dodržet rovnoměrné rozložení teploty v celé vsázce. I při velmi malé rychlosti ohřevu jsou okrajové části vsázky ohřáty na žíhací teplotu mnohem dříve. Okrajové části vsázky by proto měly být ochlazovány velmi pomalu. Na povrchu vsázky je však nebezpečí že materiál vychladne rychleji. Mnohem lepší rozložení teploty je v pecích malých nebo pecích průběžných (tunelových nebo válečkových). V komorových pecích se ohřev provádí pomalu nebo i postupně. Aby se vyrovnala teplota mezi povrchovými a vnitřními částmi vsázky, bývá u komorových pecí do ochlazování zařazena výdrž na teplotě ležící těsně pod bodem přeměny. Stav oceli po tomto tepelném zpracování je označován v normách jakosti oceli doplňkovým číslem 3.

2.1.6 Žihání na odstranění pnutí

Účelem tohoto žihání je odstranit vnitřní pnutí bez záměrné změny struktury a bez podstatných změn vlastností oceli. Vnitřní pnutí v oceli nevzniká jen nerovnoměrným chladnutím po tváření za tepla a svařování, ale i po tváření za studena (rovnání). Žihání na odstranění vnitřních pnutí je ohřev na teplotu nižší než A_{c1} , výdrž na této teplotě a pomalé ochlazování. Na rozdíl od žihání naměkko zde stačí asi dvouhodinová výdrž na teplotě.

2.1.7 Žihání rekrystalizační

Rekrystalizačním žiháním se má docílit obnovení tvárných vlastností oceli po tváření za studena. U ocelí tvářených za studena lze tímto žiháním dosáhnout zjemnění ve výjimečných případech i ke zhrubnutí zrna. Rekrystalizační žihání je ohřev oceli tvářené za studena na teplotu v oblasti rekrystalizace, výdrž na této teplotě a následující ochlazování. Teplota nesmí překročit teplotu bodu A_{c1} , jinak nastává překrystalizace. Protože se musí přesně dodržet žihací teplota, používá se k rekrystalizačnímu žihání elektrických žihacích pecí.

2.1.8 Protivločkové žihání

Tímto žiháním se má zabránit vzniku vnitřních trhlin v oceli, které se pro svůj charakteristický tvar nazývají vločky. Vločky jsou způsobeny tlakem vodíku, ale i pnutím vzniklým při tváření, ochlazování a fázové přeměně. Rozpustnost vodíku v oceli klesá úměrně se snižováním teploty, proto při tuhnutí oceli je jeho obsah největší v místech, která ztuhla naposled. Protivločkové žihání se nejčastěji uskutečňuje po tváření za tepla. Výkovky nebo vývalky se přímo z tvářecí teploty nasazují do vychlazovací pece nebo do tepelně izolované jámy, kde zvolna chladnou. Pomalé ochlazování má umožnit unikání vodíku z výrobku difúzí.

2.1.9 Žihání pro odstranění křehkosti po moření

Ohřev materiálu se obvykle provádí na teplotu v rozmezí 300 až 450 °C, poté krátká výdrž na této teplotě a ochlazování. Účelem je odstranit křehkost po moření způsobenou vodíkem. Tento nežádoucí jev se projevuje při tažení. Vodík vniklý do oceli při moření se dá snadno odstranit a ocel pak nabude zase původní tažnosti.

2.2 Energetická analýza

Hutnictví železa je energeticky značně náročné, neboť dosahuje ve světě asi 11 % z celkové spotřeby přírodních energetických zdrojů [5]. Základním ukazatelem charakterizujícím úroveň energetického hospodářství hutního závodu je palivoenergetická náročnost (PEN). Je to spotřeba paliva a energie na vstupu do závodu vztažená na jednotku výroby. Za jednotku výroby se obvykle bere 1 tuna oceli. Tento ukazatel má přednost v tom, že jediným číselným údajem charakterizuje dosaženou úroveň energetického hospodářství. Jeho nevýhodou je, že nemůže zachytit kvalitativní změny dosažené v hutní výrobě. Z kvalitativního hlediska je pro žihání důležitá zejména jakost povrchu žihaného materiálu.

2.2.1 Povrch žihaného materiálu

Při zvýšených teplotách, jaké nastávají například při tepelném zpracování kovů, mohou nastat vzájemné reakce materiálu se složkami prostředí, které jej obklopují. Podle toho, zda jde o přirozené ovzduší nebo o atmosféru s více nebo méně spálenými topnými plyny, mohou převládat reakce oxidační nebo redukční. Následkem oxidačních reakcí bývá

tvorba povrchových vrstev oxidů, vznik náběhových barev nebo ochuzení slitiny o snáze oxidovatelnou složku, např. oduhličení. Naopak prostředí, v němž převládají redukční složky, může za určitých předpokladů vést k rozkladu oxidů na původní kov, k usazování sazí na povrchu ohřívaného kovu a při zpracování oceli i k jejímu nauhličení. Reakce tohoto typu lze v některých zvláštních případech využít k ovlivnění povrchu materiálu v žádaném smyslu. Ve většině případů jsou však následky samovolných reakcí nežádoucí a škodlivé, protože zhoršují jakost povrchu, mění mechanické, fyzikální a často i chemické vlastnosti materiálu. Materiál původních vlastností lze obnovit mechanickým nebo chemickým odstraněním povrchové vrstvy (broušením, tryskáním, leštěním, mořením). Tento způsob vyžaduje přídavné opracování kovu a navíc je doprovázen ztrátami na materiálu. Tyto ztráty (opal) jsou v ohřívacích pecích přibližně 1 až 2 % váhy materiálu [6]. U drobnějších polotovarů, charakterizovaných větším povrchem, jsou ztráty ještě úměrně větší. Proto mají tyto nežádoucí účinky na povrch materiálu významný vliv pro energetickou úsporu na dalším případném opracování materiálu. Těmto účinkům se však dá zabránit použitím tzv. ochranných atmosfér v pracovním prostoru pece.

2.2.2 Působení plynů na povrch kovů

Opal kovu závisí především na době ohřevu, teplotě, složení pecní atmosféry a chemickém složení oceli. Téměř všechny kovy, s výjimkou drahých kovů, jsou látky značně reaktivní. Většina z nich je schopna vytvářet sloučeniny a to i se složkami normálního ovzduší i pecní atmosférou. Týká se to především tvorby oxidů za působení elementárního kyslíku, vodní páry nebo oxidu uhličitého. Vznik nitridů z elementárního dusíku a vznik nejvýš nežádoucích sirných sloučenin.

2.2.2.1 Oxidace oceli

Plyny způsobující oxidaci oceli jsou hlavně kyslík, vodní pára, oxid uhličitý, oxid siřičitý apod. Oxid siřičitý je v ochranných atmosférách zcela nepřipustný. Oxidační reakce jsou např.:



Oxidací povrchu oceli při ohřevu rostou náklady na povrchovou úpravu. Ztráty kovů propalem jsou až 2 % váhy při každém ohřevu během tepelného zpracování a dosahují až 5 % při ohřevu před tvářením za tepla. Povrch materiálu je nutno připravovat zvláštními operacemi pro další úpravy směřující ke konečnému výrobku. Tyto operace, ať již jde o mechanické úpravy povrchu broušením a leštěním, omíláním tlakem, tryskáním, kartáčováním apod., nebo o úpravy chemické, jako je např. moření, zvyšují náklady tepelného zpracování o 10 % i více.

2.2.2.2 Oduhličení a nauhličení oceli

Oduhličení je reakce plynů s uhlíkem v oceli ať již v tuhém roztoku, nebo v podobě Fe_3C , při nichž se povrchové vrstvy ocelových výrobků ochuzují o uhlík. Nauhličení je chemické působení plynů na železo, při němž se v povrchové vrstvě ocelových výrobků absorbuje uhlík v atomárním stavu železem a tvoří se Fe_3C . Plyny, které oduhličují ocel jsou oxid uhličitý a vodík.

Rovnice pro oduhličení oceli jsou tyto:



Oduhličení oceli má stejně nepříznivé následky jako zokujení. Oduhličením se ocel stává na povrchu měkkou a nekalitelnou, okujením se tvoří v povrchu oceli vrásky, důlky a jiné nerovnosti. Oduhličení má za následek i vznik trhlin při tváření. Je příčinou snížení meze únavy u pružin. Povrchové oduhličení může také zhoršit chemické vlastnosti oceli, např. náchylnost oceli ke korozi, zejména za přítomnosti dusíku.

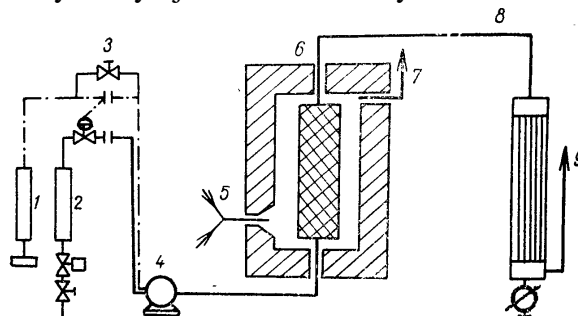
2.2.3 Ochranné atmosféry

Opal a s ním spojené nežádoucí reakce lze omezit nebo úplně odstranit tím, že se z pecního prostoru vyloučí škodlivě se projevující složky. Úplné odstranění atmosféry z pece, které se zdá nejjednodušším řešením, naráží na spoustu technických problémů týkajících se konstrukčního řešení pece. Proto se dnes nejčastěji postupuje tak, že se přirozené ovzduší v peci nahradí umělou (řízenou) atmosférou. Tato atmosféra se účelně připraví tak, aby neobsahovala škodlivé složky ve významných koncentracích, nebo tak, aby se účinky reakčních složek vzájemně doplňovaly a nepůsobily vůbec na povrch materiálu.

Řízené atmosféry se dělí podle účinku na povrch materiálu na:

- ochranné - zabraňují průběhu nežádoucích reakcí na povrchu materiálu, jako je oxidace, oduhličení, nauhličení
- aktivní - vyvolávají v materiálu žádanou chemickou reakci, jako např. nauhličení, oduhličení, nitridaci

Pozornost bude věnována ochranným atmosférám, neboť mají významnější vliv na kvalitu zpracovávané oceli. Ochranné atmosféry lze dělit podle různých hledisek. Nejčastěji se ochranné atmosféry dělí podle základní suroviny a jejího zpracování [7]. Pro výrobu ochranných atmosfér se používá různých druhů vyvíječů a štěpičů. Na obr. 4 je znázorněno schéma vyvíječe endotermického plynu. Většinu ochranných atmosfér tvoří atmosféry exotermické a endotermické. Exotermické atmosféry jsou charakterizovány tím, že se při jejich výrobě teplo uvolňuje. U endotermických atmosfér se musí použít vnějšího ohřevu reakční retorty. Teplo se tedy do vyvíječů endotermických atmosfér musí dodávat.



Obr. 4 Vyvíječ endotermického plynu

1 – vzduch, 2 – topný plyn, 3 – regulace směsi, 4 – dmýchadlo, 5 – hořák, 6 – retorta,
7 – pecní spaliny, 8 – chladič, 9 - endoatmosféra

2.2.3.1 Exotermické atmosféry

Jsou nejčastěji používané řízené atmosféry, neboť jsou levné a vhodné pro všechny druhy pecí. Vyrábějí se spalováním topných plynů, jako je koksárenský plyn, svítiplyn, zemní plyn, propan, butan atd., ale i topného oleje nebo petroleje, kde množství přiváděného vzduchu je asi 55 až 98 % množství potřebného pro úplné spálení plynu. Čím větší je množství použitého vzduchu, tím levnější je atmosféra, protože se jí z daného množství paliva více vyrobí. Pro tzv. chudý plyn se mísí vzduch s plynem obvykle v poměru 4:1. U tzv. bohatého plynu je poměr vzduchu k plynu až 2,5:1. Se zvětšováním množství spalovacího vzduchu klesá v atmosféře obsah spalitelných složek a zvyšuje se obsah CO_2 a N_2 . Při úpravě exoatmosféry se odstraňuje síra a absorbuje se CO_2 a H_2O .

2.2.3.2 Endotermické atmosféry

Při výrobě těchto atmosfér se rovněž využívá reakce topného plynu se vzduchem. Reakční teplo ovšem nestačí k udržení soustavy na teplotě umožňující průběh děje v žádaném smyslu. Proto je třeba reakční retortu vyhřívat zevně přídavným elektrickým nebo plynovým topením. Vyhovující atmosféry tohoto typu mají mít přibližně 20 % CO , 35 až 50 % H_2 , 25 až 45 % N_2 , při čemž obsah CO_2 je 0,2 až 0,4 % a vlhkost obvykle 0 až -10 °C. K udržení tak nízkých obsahů oxidu uhličitého a vody je nutné dokonalé dávkování obou výchozích plynů, ale i dodržování stálého složení topného plynu. Výkyvy v dávkování plynů nebo jejich složení mají za následek buď vzrůst obsahu CO_2 a vlhkosti, nebo naopak vznik sazí zanášejících katalyzátor v reakční retortě. Uhlíkový potenciál těchto atmosfér je dostatečně vysoký, aby se jich mohlo použít jako ochranných atmosfér pro všechny druhy uhlíkových ocelí.

2.2.3.3 Dusík

Dusík se velmi často používá jako bezpečnostní opatření pro vyplachování pecí před vpuštěním hořlavé ochranné atmosféry a po jejím použití. V průmyslovém měřítku se dusík nejčastěji získává buď jako odpadní produkt kyslíkárny, nebo úplným spálením štěpeného čpavku. Dusíkové atmosféry se uplatňují zejména při lesklém žíhání za studena válcovaných pásů nízkouhlíkové oceli, ale i při světlém měkkém žíhání vysokouhlíkových ocelových tyčí a drátů.

2.2.3.4 Štěpený čpavek

Velmi rozšířená je atmosféra vyráběná štěpením synteticky vyrobeného čpavku na směs 75 % H_2 a 25 % N_2 . Čpavek se zkapalňuje a dodává se v lahvích, tlakových sudech i v cisternách, čímž se náklady na transport silně snižují. Nevýhodou této atmosféry je její výbušnost a poměrně vysoká cena.

2.2.3.5 Vodík

Vodík se dodává stlačený v ocelových lahvích. Je to drahá ochranná atmosféra, snadno vznětlivá a explozivní v široké oblasti 4 až 74 % H_2 ve vzduchu. Podle způsobu výroby obsahuje nečistoty jako kyslík, dusík, vodní páru, oxid uhličitý, metan nebo oxid uhelnatý a stopy oleje. Za technický vodík lze považovat atmosféry vznikající štěpením topného plynu vodní párou. Nejčistší vodík se získá difusním čištěním rozštěpeného čpavku nebo technického vodíku paládiovými membránami.

2.2.3.6 Inertní atmosféry

Jsou to v podstatě plyny ze skupiny vzácných plynů, které zaručeně nereagují s kovy. Jde především o hélium a argon, někdy i o neon, krypton a xenon. S výjimkou hélia se všechny ostatní plyny vyrábějí frakční destilací vzduchu, kde jsou obsaženy v nepatrném množství.

2.2.3.7 Vakuum jako ochranná atmosféra

Vakuum je poměrně levné ochranné prostředí. Další výhodou vakua je odplynění kovu, jež může zlepšit mechanické vlastnosti. Při použití vakua nemůže nastat exploze ani škodlivé působení na lidské zdraví. Značnou nevýhodou vakua je velké zhoršení přestupu tepla při nižších ohřívacích teplotách nebo při ochlazování. Vakua se často používá pro světlé žíhání pásů z nerezavějících ocelí, jež jsou citlivé vůči většině plynů. V poslední době se tepelné zpracování ve vakuu velmi rozšířilo zejména v leteckém průmyslu a v jaderné technice.

2.3 Emisní analýza

Stejně jako každá zařízení spalující určité palivo, tak i žíhací pece produkují spalováním paliva určité množství škodlivých látek, které jsou vypouštěny do ovzduší. Pro vypouštění neboli vnášení (emisi) látek znečišťujících ovzduší se používá pojem znečišťování ovzduší. Tento pojem označuje činnost nebo děj. Žíhací pece jsou řazeny mezi stacionární (nepohyblivé) zdroje znečišťování ovzduší. Charakter a množství emisí vypouštěných do ovzduší závisí zejména na velikosti spalovacího zařízení, palivu a dokonalosti spalování tohoto paliva.

2.3.1 Měření emisí

Způsob měření a zjišťování množství emisí v jednotlivých kategoriích zdrojů znečišťování ovzduší se provádí [8]:

- kontinuálním měřením
- jednorázovým měřením
- výpočtem

Kontinuální měření je trvalé měření emisí pomocí přístrojů s registrací a souběžným zaznamenáváním. Naměřené údaje se vyhodnocují pomocí prostředků výpočetní techniky v průběhu kalendářního roku. Kontinuální měření musí být prováděno u těch zdrojů znečišťování, u nichž jsou emise znečišťujících látek při ročním provozu větší než:

200 t tuhých znečišťujících látek, 1000 t SO₂, 200 t NO_x, 50 t CO, atd.

Jednorázová měření, nejčastěji jednou do roka, se provádí u středně velkých zdrojů znečištění.

Výpočtem se zjišťují emise obvykle u menších stacionárních zdrojů znečištění, pro které nejsou stanoveny emisní limity.

U žíhacích pecí se měří nejčastěji koncentrace plyných znečišťujících látek. Měřicí místo pro měření koncentrace emisí se volí podle konstrukce pece, nejčastěji v kouřovodu pece před rekuperátorem, v odtahovém kanálu nebo v komíně. Měření probíhá za běžných provozních podmínek v době ohřevu materiálu. Koncentrace znečišťujících látek se měří pomocí analyzátorů plynů a spalin.

2.3.2 Analyzátory plynů a spalin

Provozní měření chemického složení plynů nabývá v současné době velmi na významu, zejména v souvislosti s regulační a řídicí technikou a v souvislosti se snahami zvýšení hospodárnosti provozu [9]. Obsah určité složky plynu ve spalinách, odpadních plynech a jiných plyných směsích se označuje jako koncentrace. Tuto koncentraci lze vyjádřit

jako podíl objemu nebo hmotnosti složky plynu a celkového množství plynného média. Jedná se pak o objemovou koncentraci (%) a hmotnostní koncentraci (g.m^{-3}). Většina automatických analyzátorů plynu je cejkována v objemové koncentraci. Měrná složka plynu se pak udává v procentech. Měření chemického složení plynu automatickými analyzátory je založeno na několika fyzikálních principech. Vzhledem k různým specifickým vlastnostem jednotlivých složek měřeného plynu není možno nalézt universální metodu a universální analyzátor, který by mohl v provozních podmínkách provádět analýzu všech složek měřeného plynu. Proto jednotlivé fyzikální principy a příslušné analyzátory slouží vždy ke stanovení obsahu určité látky nebo skupiny plynných látek. Podle jednotlivých fyzikálních principů rozeznáváme:

- analyzátory založené na tepelné vodivosti plynu
- analyzátory založené na spalném teple plynu
- analyzátory pro určení obsahu kyslíku
- infračervené analyzátory plynu

Analyzátory mohou plnit dokonale svou úlohu, pokud se správným způsobem provádí odběr a úprava měřených plynů přiváděných do analyzátoru. Vzorky odebíraného plynu se musí především zbavit mechanických nečistot a vlhkosti, musí se zchladit na potřebnou teplotu a musí být provedena úprava tlaku a průtoku přívodním potrubím podle parametrů analyzátoru.

3 TECHNICKÉ PARAMETRY ŽÍHACÍCH PECÍ

Žíhací pece jsou technologická zařízení, která vytváří optimální podmínky pro konečné tepelné zpracování podle daného technologického procesu. Žíhací proces tepelného zpracování je charakterizován teplotou ohřevu, dobou výdrže na této teplotě a způsobem ochlazování. Mnohdy však je průběh tepelného zpracování mnohem složitější a skládá se pak z několikastupňového ohřevu, výdrže a ochlazování podle zadaného diagramu, který charakterizuje danou technologii žíhání. U většiny žíhacích pecí jsou však pracovní teploty nižší než 1000 °C. Doba výdrže musí zajistit vyrovnání teplot ve vsázce a dokonalé proběhnutí modifikačních přeměn. Zvýšené požadavky na jakost zpracovávaného materiálu vyžadují vyšší rovnoměrnost teplotního pole vsázky než u běžných ohřívacích pecí, a sice do 1 K.cm⁻¹ tloušťky [10]. Vyrovnávací fáze trvá někdy až desítky hodin. Různé způsoby zpracování vyžadují i různou intenzitu ochlazování, která předurčuje mnohé mechanické vlastnosti oceli. Nejpomalejším ochlazováním je ochlazování výrobku v pecním prostoru. Rychlejším způsobem je chlazení vsázky na vzduchu při volném nebo nuceném proudění.

Vzhledem k velmi bohatému rozměrovému a tvarovému sortimentu výrobků mají žíhací pece velkou rozmanitost v konstrukčním provedení i ve způsobu ohřevu. Podle způsobu ohřevu jsou žíhací pece konstruovány na:

- pece s přímým ohřevem - u pecí s přímým ohřevem je vsázka v bezprostředním kontaktu s pecními plyny. Provádí se tehdy, není-li požadován neoxidovaný povrch materiálu. Jsou však známy i pece s přímým ohřevem, zaručující čistý povrch bez okují.
- pece s nepřímým ohřevem - kde je materiál chráněn před pecní atmosférou ochranným poklopem (muflí), pod který se přivádí řízená atmosféra v předepsaném složení. Spaliny své teplo předávají nepřímo prostřednictvím poklopu. Pokud pece s nepřímým ohřevem nemají ochranný poklop, uzavírají se spaliny do prostoru odděleného od vsázky. Jedná se o pece vytápěné sálavými trubkami. Oba typy pecí s nepřímým ohřevem musí být dokonale utěsněny, aby do řízené atmosféry nemohl vnikat atmosférický vzduch. Velkou předností těchto pecí je podstatné snížení zokujení povrchu oceli.

Podle tepelného a teplotního režimu se dělí žíhací pece na pece pracující periodicky nebo průběžně. U periodicky pracujících pecí se vsázka během tepelného zpracování nepohybuje, tepelný a teplotní režim pece je nestacionární a mění se podle předepsaných hodnot. K nejvíce používaným periodicky pracujícím pecím patří pece komorové a pokloповé. V průběžných pecích se materiál pohybuje a postupně prochází jednotlivými zónami, jejichž teplota se s časem nemění. Jejich teplotní režim je tedy stacionární. Z hlediska energetických zdrojů lze žíhací pece rozdělit na žíhací pece plynové, elektrické a na tekutá paliva. V dalších podkapitolách jsou uvedeny nejběžnější typy žíhacích pecí.

3.1 Komorové žíhací pece

Komorové žíhací pece se používají v provozech zpracovávajících tvarově i rozměrově různorodou vsázku. Ohřívá se v nich materiál o hmotnosti řádově desetin kg až stovek tun. Během celého technologického procesu vsázka leží na nístěji. Teplota pracovního prostoru těchto pecí je ve všech bodech prakticky stejná [11]. Rozmanitost vsázky vedla ke konstrukci různých typů komorových pecí.

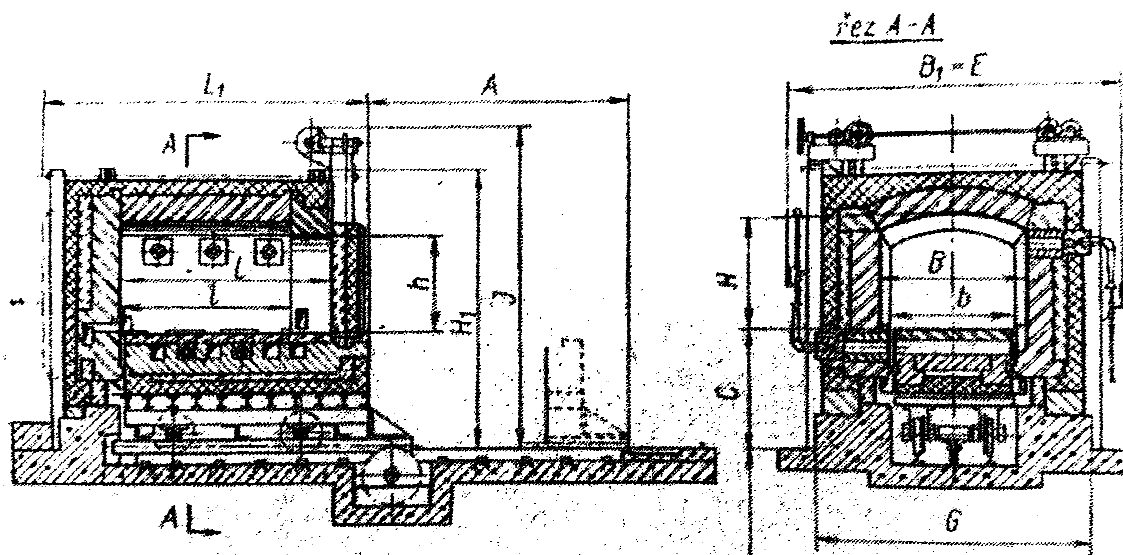
Podle konstrukce lze rozeznat dvě základní provedení:

- s pevnou nístějí
- s pohyblivou nístějí (vozové pece)

Komorové pece s pevnou nebo výjezdnou nístějí mají v podstatě stejné konstrukční provedení jako kovářské komorové pece, avšak vzhledem ke zvýšeným požadavkům na rovnoměrnost ohřevu jsou otápěny větším množstvím hořáků, rovnoměrně rozmístěných v pecním prostoru.

3.1.1 Konstrukce komorových pecí

Konstrukce vozových žíhacích pecí je nejčastěji zhotovena z profilových nosníků zkonstruovaných tak, aby odolávaly tepelnému pnutí, a je svařena do celků. Jednotlivé celky jsou smontovány a zabudovány do betonových základů. Boční stěny jsou nejčastěji z plechů přistehovaných na ocelovou konstrukci. Pece s výjezdnou nístějí mohou mít větší půdorysné rozměry délky až 20 m a šířky do 6 m. Doporučuje se, aby délka pece s pevnou nístějí nepřesahovala 3 m. Výška pecí nepřesahuje 5 m. Délka a šířka vozu bývá přizpůsobena velikosti pece. Pece však mívají i dva vozy, které jsou při provozu vzájemně spojeny. Tato konstrukce značně usnadňuje přípravu nové vsázky, zatímco druhá vsázka je žíhána v peci. Pohyb vozu se provádí přes kladku pomocí jeřábu nebo mechanicky. Pohyblivá nístěj vyjíždí z pece po kolejnicích a slouží tak ke snadnějšímu sázení i tažení vsázky. Pojezdová dráha z kolejnic vede průběžně přes celou pec. Dveře mají svařovanou ocelovou konstrukci. Jsou ovládány mechanicky z místa. Tyto pece mají téměř univerzální použití. Pokud je nutný ohřev v ochranné atmosféře, vkládají se výrobky do plechových skříní (muflí). Příklad komorové pece s výjezdnou nístějí pro tepelné zpracování je uveden na obr. 5.



Obr. 5 Komorová pec s výjezdnou nístějí pro tepelné zpracování

3.1.2 Vyzdívka komorových pecí

V nepřetržitě pracujících provozech je možno užít u komorových pecí vyzdívky klasické, nejčastěji šamotové, s dostatečnou tepelnou kapacitou. Vyzdívka musí být dobře izolována, aby nedocházelo ke ztrátám tepla do okolí. Šamoty jsou nejrozšířenějším materiálem používaným pro stavbu pecí. Jejich žárovzdornost a odolnost proti deformaci

v žáru při zatížení závisí na jejich složení. S rostoucím obsahem Al_2O_3 se tyto vlastnosti zvyšují. Typickou vlastností šamotu je počátek měknutí při nižších teplotách. Tato okolnost omezuje použití šamotu do teploty 1400°C . Jsou však odolné proti změnám teplot v celém rozsahu použití, to je dáno nižší délkovou teplotní roztažností. Lehčené šamoty mají nižší objemovou hmotnost, pevnost v tlaku a měrnou tepelnou vodivost. Zdivo lze také nahradit žárobetonem. Teplo akumulované ve zdivu umožní rychlejší nárůst teploty vsázky v počátečních fázích ohřevu. Tohoto akumulovaného tepla však nelze využít při ohřevu jakostnějších ocelí nebo při vyšším stupni zaplnění pecního prostoru. Intenzivní, nestejnorodý přenos tepla sáláním ze stěn na vsázku způsobuje nerovnoměrný ohřev materiálu a nežádoucí teplotní pnutí. V tomto případě se před sázením materiálu musí pec ochladit.

Pece pracující přerušovaně je třeba vyzdívát materiálem s nízkou akumulační schopností. Výhodné jsou žáruvzdorné vláknité materiály. Pro teploty použití do 1000 až 1100°C se vyrábí vlákna křemičitá nebo křemenná s vysokým obsahem SiO_2 . Produktem při výrobě vláken je vlna. V surovém stavu se vlna téměř nepoužívá. Z vlny se většinou vyrábí další výrobky plošné nebo tvarové. U žíhacích komorových pecí se nejčastěji používají rohože, které se vyznačují dobrou ohebností. Často se však používá tzv. vláknitá izolace kdy je vláknitý materiál v určité části konstrukce pece v kombinaci s jinými materiály hutními nebo lehčenými. Vláknitá izolace může být provedena na vnějším nebo vnitřním povrchu vyzdívky. Upevnění vláknité izolace se provádí pomocí ocelových trnů nastřelovaných do vyzdívky nebo trnů keramických zatmelovaných. Na tyto trny se vláknitý materiál upevňuje kotevními příchytkami. Vláknitých materiálů se využívá pro jejich výhodné vlastnosti. Mezi nejvýhodnější vlastnosti patří zejména:

- nízká tepelná vodivost
- nízká objemová hmotnost
- odolnost proti náhlým změnám teplot
- zvuková pohltivost, odolnost proti vibracím a otřesům

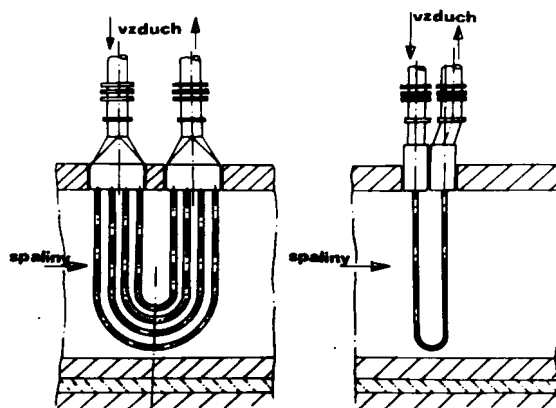
Využitím těchto vlastností se dosahuje snížení spotřeby energie pro provoz i uvádění pecí do chodu, snížení tloušťky a hmotnosti vyzdívky pece a z toho plynoucí snížení hmotnosti ocelové konstrukce, základů a příslušenství pece.

3.1.3 Topný systém komorových pecí

Vzhledem ke zvýšeným požadavkům na rovnoměrnost ohřevu jsou komorové žíhací pece otápěny větším množstvím hořáků, rovnoměrně rozmístěných v pracovním prostoru. Velikost a rozmístění hořáku u komorových pecí se volí tak, aby nedošlo k místnímu přehřátí vsázky. Hořáky se často umísťují do obou bočních stěn pece nad nístějí. U pecí s větší výškou pracovního prostoru se používají hořáky v horní části bočních stěn. Materiál se ukládá na podložky, které zajišťují procházení tepla volně pod vsázkou. Pro rovnoměrnost proudění spaliny v pecním prostoru se mezi vsázkou a stěnami (mezi jednotlivými kusy materiálu) ponechává mezera. Hořáky se automaticky střídavě spouštějí a intenzivně promíchávají spaliny v pecním prostoru. Dříve se nejčastěji vyskytovaly hořáky krátkoplamenné. Dnes se u komorových pecí užívají různé typy hořáku vysokorychlostních nejčastěji nízkotlakých.

Spaliny mají v celém pracovním prostoru pece přibližně stejnou teplotu. Tepelná účinnost komorových pecí je nízká, obzvláště není-li využito předeřevu spalovacích složek. Spaliny odvádějí až 65% z celkového množství přivedeného chemického tepla. Modernější komorové pece jsou konstruovány s rekuperátory pro předeřev spalovacího vzduchu. Nejpoužívanějšími typy jsou rekuperátory trubkové umísťované do odtahového kanálu, který

ústí do komína. Na obr. 6 jsou zobrazeny smyčkové trubkové rekuperátory používané u komorových pecí.



Obr. 6 Vícesmyčkový a jednosmyčkový rekuperátor

3.1.4 Vsázka komorových pecí

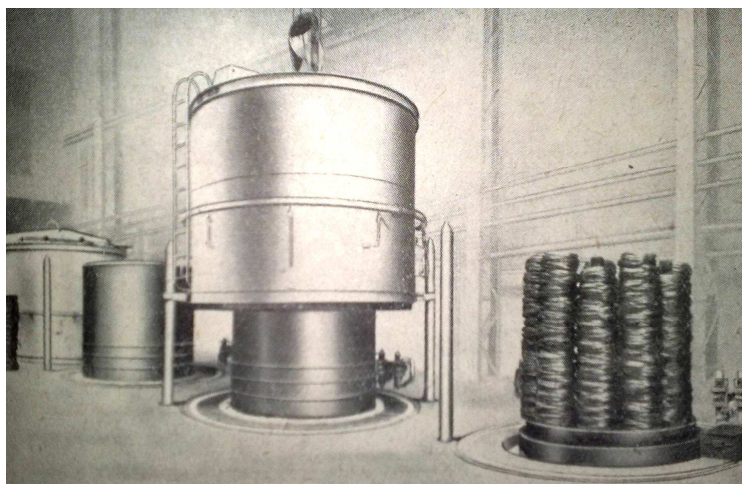
Jak už bylo řečeno, druh vsázky komorových pecí je velmi rozmanitý. V komorových žíhacích pecích se ohřívá vsázka různé jakosti, tvaru i hmotnosti, proto je měrná spotřeba tepla vysoká. Slouží hlavně k žíhání tyčové oceli ve svazcích, ploštín, sochorů, předvalků, bram, ingotů, výkovků, válců apod. Celková hmotnost vsázky je dána příslušným technologickým postupem, jednotlivými jakostmi a konstrukcí pece. Pece se stacionárním režimem ohřívají větší množství drobnějšího materiálu. Naopak u pecí nestacionárně pracujících se veškerý materiál sází a vytahuje najednou a mívá často i větší rozměry.

3.2 Pokloповé žíhací pece

Dnešní pokloповé pece s řízenými atmosférami se skládají ze tří částí: z podstavce, dále z ochranného poklopu ze žáruvzdorné oceli a z vlastního topného poklopu. Tyto pece mají mnoho konstrukčních řešení jak ve tvaru poklopu, tak ve způsobu vytápění. Podle tvaru poklopu, který je přizpůsoben zpracovávané vsázce se používají jak čtyřhranné, tak i kruhové poklopy [6]. Vytápěny pak pokloповé pece mohou být nejčastěji plynem pomocí plynových hořáků, nebo elektricky.

3.2.1 Konstrukce pokloповých pecí

U pokloповých pecí je vsázka uložena na nepohyblivé nístěji a přikryta ochranným poklopem ze žáruvzdorného chromniklového ocelového plechu tloušťky asi 3 mm, pod který se přivádí řízená atmosféra. Na ochranný poklop (muflí) se nasazuje topný poklop s hořáky u palivových pecí nebo topné odpory u pecí elektrických. Oba poklopy jsou utěsněny jemným křemičitým pískem, který zabraňuje přístupu atmosférického vzduchu. Po ukončení ohřevu a výdrže se topný poklop přenesení jeřábem na další nístěj a ochlazovaný materiál chladne pod ochranným poklopem v řízené atmosféře. Obvykle připadá jeden topný poklop na tři nístěje, jak je vidět na obr. 7 níže. Na první probíhá žíhání, druhá slouží na ložení materiálu a třetí je nístěji chladnoucí. Tento způsob je nejen investičně méně náročný, ale je také menší měrná spotřeba tepla neboť se využívá akumulovaného tepla ve vyzdívce topného poklopu.



Obr. 7 Pokloповé pece s okrouhlými poklopy

3.2.2 Vyzdívka pokloповých pecí

Vyzdívka topného poklopu musí být provedena tak, aby měla co nejmenší hmotnost kvůli snadnému transportu jeřábem a malé ztráty tepla vedením do okolní atmosféry. Nejčastěji používaným materiálem je šamot, lehčený šamot, případně jiné lehčené materiály. Vyzdívku lze také vytvořit z žárobetonových tvárnic, které její montáž podstatně zrychlí. Topný poklop vytápějící více nístěj není vhodné vyzdívat vláknitými materiály. Tento druh vyzdívky má velmi malou akumulaci schopnost. Ohřev vsázky při nasazení teplého poklopu by probíhal pomaleji než u vyzdívky klasické šamotové.

3.2.3 Topný systém pokloповých pecí

Plamenné pokloповé pece se vytápějí plynem. Hořáky jsou rozmístěny po obvodu ve spodní části topného poklopu. Při nasazování poklopu se musí vždy připojit rozvod spalovacích plynů. Z toho důvodu se dříve pokloповé pece vybavovaly injektorovými hořáky, které nepotřebují přísun vzduchu. Hořáky byly nasměrovány kolmo do středu pece. Ochranný poklop však musel být chráněn proti propálení zídka z žáruvzdorného materiálu.

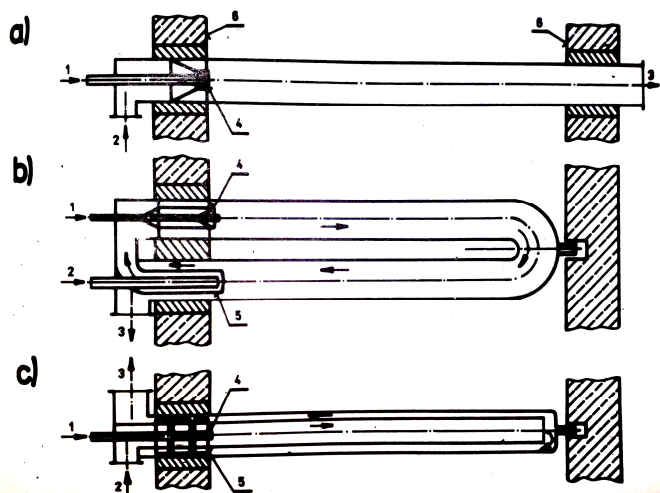
Dnešní pokloповé pece používají hořáky s vyššími výstupními rychlostmi. Tyto hořáky však vyžadují ventilátorový spalovací vzduch. Spaliny proudící ve směru tečny k povrchu ochranného poklopu směřují do horní části. Připojování topného poklopu se usnadňuje vzduchovým ventilátorem umístěným přímo na zvláštní konstrukci připevněné na boční straně poklopu. Nevýhodou je zvýšená hladina zvuku v okolí pece. Výstupní otvor pro spaliny se obvykle nachází v horní části topného poklopu. Při vysokoteplotním žíhání, kdy nelze nucenou cirkulaci řízené atmosféry zajistit rovnoměrné rozložení tepla v pecním prostoru, užívá se místo plynových hořáků elektrického vytápění. Odporové elementy se rozmísťují po celé boční ploše topného poklopu. Plynové pokloповé pece se vytápějí i sálavými trubkami, jež jsou znázorněny na obr. 8. Trubky se umísťují nejčastěji svisle podél ochranného poklopu.

Nejvíce se používá 3 základních druhů sálavých trubek:

- průchozí sálavé trubky - jejich nevýhodou je dvojitý průchod trubky stěnou pece, a tím i možnost větší netěsnosti vyzdívky pece. Vyrábějí se v provedení přímém, tvaru "U", případně tvaru "W" s vícenásobným průchodem v pracovním prostoru.

- dvouplášťové sálavé trubky - hořák trubky i odvod spalin je umístěn na jednom konci trubky. Trubka prochází pouze jednou vyzdívkou pece.
- recirkulační sálavé trubky – recirkulací spalin se zvyšuje rovnoměrnost rozložení teploty po celé délce trubky.

Palivo je spalováno v uzavřeném prostoru tvořeném trubkou, která je spalinami ohřívána na vysoké teploty. Teplo je předáváno sáláním vnějšího povrchu trubky. Hořáky sálavých trubek musí zajistit rovnoměrné rozložení teploty po délce trubky. Nejrovnoměrnější rozdělení teplot je při použití vysokorychlostních hořáků, které se používají u recirkulačních sálavých trubek. Pro využití tepla odcházejících spalin se do tělesa radiační trubky umísťují rekuperátory jehlového typu pro předehřev spalovacího vzduchu. Teplota sálavých trubek bývá až 1200 °C. Zhotovují se buď z ocelových trubek válcovaných, nebo odstředivě litých, případně z trubek keramických.



Obr. 8 Provedení sálavých trubek

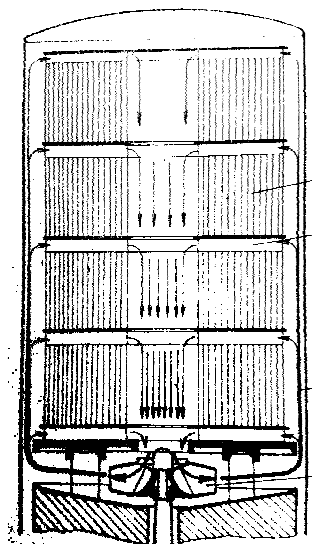
a - průchozí přímá sálavá trubka

b - průchozí sálavá trubka tvaru "U"

c - dvouplášťová sálavá trubka

1 - přívod plynu, 2 - přívod vzduchu, 3 - odtah spalin, 4 - hořák, 5 - rekuperátor,
6 - vyzdívka pece

Cirkulace řízené atmosféry v ochranném poklopu lze dosáhnout oběhovým ventilátorem umístěným v nístěji pece. Tím se dosáhne intenzivního přechodu tepla z horké vnitřní stěny poklopu na atmosféru a současně vznikne mezi vnitřním prostorem a stěnou uvnitř poklopu tlakový spád. Horká atmosféra proudí ke středu poklopu, protéká žíháním materiálem a ohřeje ho rychle na stejnoměrnou teplotu. Schematický řez pecí je na obr. 9. Tento způsob však jde realizovat pouze do teplot cca 750 °C. Pro vysokoteplotní žíhání zatím ventilátory neexistují a využívá se přirozené konvekce řízené atmosféry.



Obr. 9 Cirkulace řízené atmosféry pod ochranným poklopem během žíhání

3.2.4 Vsázka poklopových pecí

V poklopových pecích se nejčastěji žíhají svitky plechů a pásů válcované za studena, ale také svitky drátu. Svitky se ukládají do sloupců, tři až čtyři na sebe a mezi ně se vkládají tzv. konvekční vložky. Tyto vložky umožňují přístup řízené atmosféry k čelům svitků. Značně se tím zkracuje doba vyrovnávání teplot, neboť tepelná vodivost pásů je mnohokrát větší než vodivost ve směru kolmém na jednotlivé závity. Svitky se žíhají v poklopových pecích i ve více sloupcích. Vícesloupcová poklopová pec má jeden společný topný poklop, přičemž každý sloupec vsázky je přikryt vlastní muflí. Celkový počet sloupců v jedné peci bývá až osm. Nejobvyklejší jsou pece třísloupcové. Ve vícesloupcových pecích je ohřev nerovnoměrný a vyžaduje delší výdrž na teplotě. Jsou výhodné pro hromadnou výrobu a menší sortiment tepelně zpracovaného materiálu. Byla navržena i technologie žíhání v uvolněných svitcích. Svitky vyválcované za studena se převinou a mezi jednotlivé závity se vloží nylonová šňůra. Po vytažení šňůry zůstává mezi závity mezera umožňující proudění řízené atmosféry. Pásky mají rovnoměrné vlastnosti po celém průřezu. Nevýhodou je však velký průměr uvolněných svitků a nutnost převíjení pásů před a po tepelném zpracování.

3.3 Průběžné žíhací pece

Pece tohoto typu pracují stacionárně. Hlavní zvláštností průběžných pecí, jako technologického agregátu, je nepřetržitost celého žíhacího procesu, proto jsou vhodné zejména pro žíhání pásů a plechů. Investiční náklady na stavbu průběžných pecí jsou sice vyšší než u pecí pracujících periodicky, ale doba návratnosti investic je velmi krátká.

Ve srovnání s poklopovými pecemi mají pece průběžné následující výhody:

- rovnoměrnost mechanických vlastností a struktury po délce materiálu
- lepší jakost povrchu
- pásy se nelepí
- lepší rovinatost pásů
- vysoká výkonnost pecí
- snadnější mechanizace a automatizace provozu

3.3.1 Konstrukce průběžných pecí

Z konstrukčního hlediska se dělí průběžné pece na pece horizontální a vertikální (věžové). Horizontálními pecemi se pás protahuje ve vodorovném směru, nejčastěji po opěrných válečcích. Ve věžových pecích se pás pohybuje střídavě nahoru a dolů, směr pohybu se mění po vratných válečcích. Horizontální pece se užívají pro černé i lesklé žíhání, vertikální pece pouze pro žíhání v řízené atmosféře. Průběžné pece se skládají ze vstupní, pecní a výstupní části. Ve vstupní části se nachází zařízení pro dopravu pásů do pece a úpravu povrchu. Tato část linky často má odvíječky svitků, aby proces mohl pracovat nepřetržitě. Konec jednoho pásu se spojuje se začátkem pásu následujícího. Zarovnání konců se provádí nůžkami, spojení pomocí svařovacího stroje. Dále se pás čistí, suší a před vstupem do pecní části prochází smyčkovým zařízením. V tomto zařízení se vytváří dostatečná zásoba pásu, aby pec mohla pracovat i během spojování pásů. Výstupní část opět tvoří smyčkové zařízení, dělicí nůžky a navíječky.

Kromě pásů lze v průběžných žíhacích pecích žíhat i jiný tvarově rozdílný sortiment. Proto existuje mnoho typů průběžných žíhacích pecí. Podle konstrukce a způsobu dopravy materiálu v peci lze průběžné žíhací pece rozdělit na:

- průběžné pece válečkové
- průběžné pece dopravníkové
- průběžné pece tunelové
- průběžné pece narážecí
- průběžné pece stráscí
- průběžné pece průtažné

3.3.2 Topný systém průběžných pecí

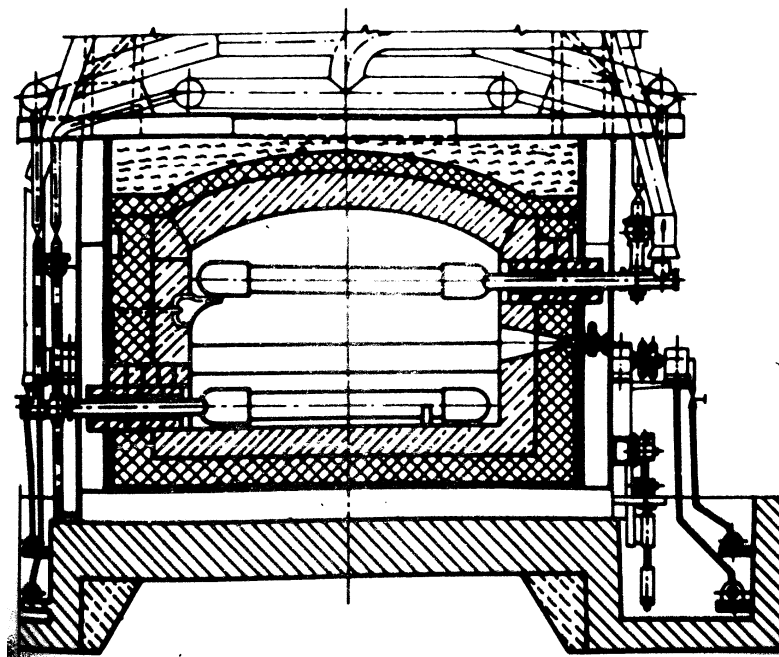
Obecně se pecní část průběžné pece skládá ze sekce ohřívací, udržovací, řízeného chlazení a rychlého chlazení.

Ohřívací sekce průběžných pecí může být buď s přímým, nebo nepřímým ohřevem. U pecí s přímým ohřevem se používají nejčastěji krátkoplamenné nebo injekční hořáky, které se umísťují nad i pod žíhaný materiál. Pokud se jedná o pec s nepřímým ohřevem, pak je pec vytápěna dvěma řadami radiálních trubek. Horní a spodní řada trubek je zasunuta z opačných stran pece, aby byl materiál po šířce ohříván rovnoměrně. Šířka pecí bývá až 3,5 m a vodorovně uložené sálavé trubky se mohou vlastní vahou prohýbat. Aby se příliš nedeformovaly, doporučuje se vždy po několika měsících provozu jejich otočení kolem své osy o 180 °. Příčný řez ohřívací sekce pece pro žíhání v řízené atmosféře ukazuje obr. 10. Stejně jako pece poklopové, tak i pece průběžné se vytápějí elektrickými odporovými elementy.

Udržovací sekce pece pro černé žíhání je prakticky stejná jako sekce ohřívací. Jediný rozdíl je, že výkon hořáků je nižší. Při žíhání v řízené atmosféře se pro tuto část pece používá elektrické vytápění.

Sekce řízeného chlazení zajišťuje pokles teploty předepsanou rychlostí. Materiál se chladí vzduchem, který u černého žíhání proudí přímo pecním prostorem a u lesklého žíhání prochází trubkami. Chladicí trubky jsou umístěny podobným způsobem jako sálavé trubky v ohřívací sekci. Rychlost chlazení se reguluje množstvím proudícího vzduchu. Chlazení může probíhat i pomocí proudu řízené atmosféry, která se chladí ve vzduchovém výměníku mimo pec.

V sekci rychlého chlazení se používají vodou chlazené panely. Modernější druhy pecí pro lesklé žíhání mají pás ochlazovaný intenzivním proudem řízené atmosféry, která prochází vodou chlazeným výměníkem.



Obr.10 Příčný řez ohřívací pecí pro lesklé žíhání pásů

3.3.3 Vsázka průběžných pecí

Průběžné pece tunelové jsou nejznámější pece pro rekrytalizační žíhání plechů a žíhání pro odstranění pnutí. Pece s válečkovou nístějí a s ochrannou atmosférou se používají pro normalizační žíhání, žíhání na odstranění pnutí, k žíhání trub, tyčí, profilů, pásů, drátěných svitků, malých součástí, výkovků atd.

4 TEPELNÁ BILANCE A TEPELNÁ PRÁCE PECÍ

Na celkovou spotřebu energie hutních závodů má rozhodující vliv spotřeba tepla v pecích. Průmyslové pece patří k největším spotřebičům tepelné energie v každém průmyslově vyspělém státě. Proto se musí pravidelně sledovat tepelná práce každé průmyslové pece, a to na základě tepelné bilance sestavené z materiálové bilance sledovaného procesu a z výsledků provozního měření. Tepelná bilance musí být sestavena i při projektování návrhu nové pece, aby se mohla určit průměrná spotřeba paliva.

Průmyslové pece lze podle charakteru tepelné bilance rozdělit do dvou skupin:

- pece s časově ustáleným (stacionárním) tepelným řádem, k nimž patří pece s nepřetržitým provozem. Se stálou spotřebou paliva během provozní doby. U těchto pecí se obvykle tepelná bilance vztahuje k jednotce času – hodině.
- pece s časově neustáleným (nestacionárním) tepelným řádem tj. pece s periodickým provozem. Většinou lze tepelnou bilanci vztahovat buď na celý průběh jednoho technologického ohřevu pece, nebo pouze na jeho část, která je pro posouzení určitého problému nejdůležitější [12].

Základem každé tepelné bilance je I. Zákon termodynamiky, podle kterého příjem a výdej energie zůstává konstantní. Žádná energie se neztrácí. Pro správné provedení tepelné bilance pece je tedy nutné sestavit podrobný rozbor příjmu a výdeje tepla. Základem je však znalost jak materiálové bilance, tak tepelných toků pecí. Vzhledem k tomu, že charakter práce jednotlivých hutnických pecí je odlišný, je nutno této skutečnosti přizpůsobit provedení a sestavení tepelné bilance. Průmyslové pece jsou většinou pece plamenné, vytápěné plynem, kapalným nebo tuhým palivem. Jejich tepelná bilance je poměrně složitá neboť, předpokládá vyčíslení mnoha položek přívodu a výdeje tepla.

4.1 Tepelné bilance pecí

Rovnice tepelné bilance průmyslových pecí vyjadřuje rovnost položek přívodu a výdeje tepla. Podle prvního zákona termodynamiky se přívod tepla musí rovnat výdeji. Levou stranu rovnice tvoří položky příjmu tepla a pravou položky výdeje. Jednotkou tepla je joule (J). Práce jednoho joulu vykonaná za jednu sekundu, tedy ($J \cdot s^{-1}$), je jeden watt. Proto má teplo jednotku watt (W).

Rovnice popisující tepelnou bilanci je tedy:

$$Q_{ch} + Q_v + Q_p + Q_{ex} = Q_u + Q_s + Q_{ned} + Q_{zpp} + Q_{ok} + Q_{zb} \quad (6)$$

kde Q_{ch} je chemické teplo paliva (W),
 Q_v - teplo předehřátého vzduchu (W),
 Q_p - teplo předehřátého paliva (W),
 Q_{ex} - teplo exotermických reakcí při oxidaci kovu (W),
 Q_u - užitečné teplo v ohřívaném kovu (W),
 Q_s - ztráta tepla odcházejícími spaliny (W),
 Q_{ned} - ztráta tepla nedokonalostí hoření (W),
 Q_{zpp} - ztráta tepla pracovního prostoru pece (W),
 Q_{ok} - ztráta tepla okujemi (W),
 Q_{zb} - ztráty zbývající, nezachytitelné výpočtem (W).

4.1.1 Chemické teplo paliva

Chemicky vázané teplo paliva Q_{ch} se vypočte ze vztahu:

$$Q_{ch} = B \cdot Q_n \quad (\text{W}) \quad (7)$$

kde B je spotřeba paliva ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) nebo ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$),
 Q_n - výhřevnost paliva ($\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}$) nebo ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$).

4.1.2 Teplo předehřátého vzduchu

Teplo jakékoli látky se rovná součinu objemu a entalpie. Entalpii lze určit ze součinu měrné tepelné kapacity vzduchu a teploty předehřevu. Teplo předehřátého vzduchu Q_v se vypočítá ze vztahu:

$$Q_v = V_v \cdot i_v \quad (\text{W}) \quad (8)$$

kde V_v je objem spalovacího vzduchu ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$),
 $i_v = c_v \cdot t_v$ - entalpie vzduchu odpovídající teplotě předehřátí ($\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}$).

4.1.3 Teplo předehřátého paliva

Při nepřehřátém palivu lze tuto položku zanedbat. Entalpie plynu je opět dána součinem měrné tepelné kapacity předehřátého plynu a teploty předehřevu. Teplo předehřátého paliva Q_p se vypočítá z výrazu:

$$Q_p = B \cdot i_p \quad (\text{W}) \quad (9)$$

kde i_p je entalpie paliva (plynu) při teplotě t_p ($\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}$).

4.1.4 Teplo exotermických reakcí

Toto teplo zahrnuje všechny exotermické reakce v pecním prostoru kromě reakce spalovací. U ohřívacích pecí jde nejčastěji o teplo vznikající při oxidaci kovu. Při určování tohoto tepla je pak nezbytně nutné znát velikost opalu v jednotlivých typech pecí. U vysokoteplotních pecí se opal pohybuje v rozmezí 0,5 až 3 % [13]. Poněvadž ohřívací pec při oxidaci 1 kg Fe vybaví asi 5650 kJ, platí pro teplo exotermických reakcí Q_{ex} následující vztah:

$$Q_{ex} = \frac{5650 \cdot G \cdot a}{100 \cdot 3,6} \quad (\text{W}) \quad (10)$$

kde G je množství vsazovaného kovu za hodinu ($\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$),
 a - opal materiálu (%).

U pecí, v nichž je opal materiálu menší než 1 %, lze teplo exotermických reakcí zanedbat.

4.1.5 Užitečné teplo potřebné k ohřevu kovu

Teplo potřebné k ohřevu kovu se vypočítá z rovnice:

$$Q_u = G \cdot (i_k'' - i_k') \quad (\text{W}) \quad (11)$$

kde i_k'' je entalpie kovu na konci ohřevu nebo tavby ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$),
 i_k' - entalpie kovu na počátku ohřevu nebo tavby ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$).

Entalpie kovu se rovná součinu měrné tepelné kapacity kovu a teploty. U tavících pecí se musí uvažovat i tavné teplo kovu a teplo odnášené struskou. Množství strusky dosahuje až 25 % váhy kovu. Celkové užitečné teplo se pak rovná součtu tepla potřebného k ohřevu kovu a tepla odnášeného struskou.

4.1.6 Ztráty tepla spaliny

Objem spalin se může měnit vyšleháváním okny, štěrbinami nebo při podtlaku v peci přisáváním falešného vzduchu. Ztráty tepla spaliny mohou dosáhnout až 60 % celkových ztrát tepla pece, proto je jejich určení velmi důležité. Pro výpočet tepelných ztrát spaliny Q_s platí rovnice:

$$Q_s = B \cdot V_{sp} \cdot i_{sp} \quad (\text{W}) \quad (12)$$

kde V_{sp} je množství vzniklých spalin z jednotky paliva ($\text{m}^{-3} \cdot \text{m}^{-3}$) nebo ($\text{m}^{-3} \cdot \text{kg}^{-3}$),
 i_{sp} - entalpie spalin opouštějících pracovní prostor pece ($\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}$).

Teplota spalin je různá u různých pecí a závisí především na teplotě ohříváního materiálu. Může se však měnit i během ohřevu. V tom případě uvažujeme průměrnou teplotu spalin během ohřevu. U komorových pecí lze použít pro výpočet komorové teploty spalin přibližného vzorce:

$$t_{sp} = t_k'' + \langle 50, 100 \rangle \quad (^\circ\text{C}) \quad (13)$$

kde t_k'' je konečná teplota ohříváního kovu.

4.1.7 Ztráty tepla nedokonalostí hoření

Ztráty tepla nedopalem vznikají při ztrátách paliva při dopravě a při nedokonalém spalování. Při ztrátách plynného a kapalného paliva se jedná zejména o netěsnosti potrubí a hořáků. U tuhých paliv jsou to zejména ztráty propadem paliva roštem nebo úletem. Při použití plynného paliva se většinou jedná o směsi plynů s vysokou výbušností. V dnešní době jsou však potrubí i hořáky dobře utěsněny a k úniku plynu prakticky nedochází, proto se u těchto typů pecí dají tyto mechanické ztráty zanedbat.

Ztráty tepla chemickou nedokonalostí hoření se při projektování nových pecí neuvažují. Při sestavování tepelné bilance provozované pece se tato položka podle potřeby uvažuje. Při průzkumu provozovaných pecí se určuje, zjistí-li se ve spalinách obsah CO.

Praxí je dokázáno, že na 1 % CO se ve spalinách vyskytuje 0,5 % H_2 . Pak pro chemickou nedokonalost platí:

$$Q_{ned} = \frac{3361 \cdot B \cdot V_{sp} \cdot n}{100} \quad (W) \quad (14)$$

kde n je obsah nespálených plynů ($CO + H_2$) ve spalínách v (%), $2/3 CO + 1/3 H_2$.

Při dobrém spalování nemá být obsah CO ve spalínách větší než 1 až 2 %. Přístroje u pecí obvykle registrují součet obou položek nespálených plynů ($CO + H_2$). Je-li analyzátozem zjišťována pouze položka CO ve spalínách a obsah H_2 se neurčuje, pak lze s dostačující přesností použít upravený tvar rovnice (14):

$$Q_{ned} = \frac{3512 \cdot B \cdot V_{sp} \cdot CO}{100} \quad (W) \quad (15)$$

kde CO je procentový obsah oxidu uhelnatého ve spalínách.

4.1.8 Ztráty tepla pracovního prostoru pece

Mezi tyto tepelné ztráty patří ztráty tepla zdívm pece, dveřmi, okny, šterbinami, chladicí vodou a ohřevem pohybujících se částí.

4.1.8.1 Ztráty tepla zdívm pece

U pecí s nepřetržitým provozem lze předpokládat, že teplotní pole ve zdívu je konstantní. Známe-li teplotu vnitřního povrchu zdíva, klenby, stěn a půdy pece, pak je možné ztrátu tepla zdívm pece určit z rovnice pro kombinovaný přenos tepla vedením a konvekcí vícevrstvou stěnou:

$$Q_{zz} = \frac{t_z - t_v}{\frac{1}{\alpha_k} + \sum \frac{b}{\lambda}} \cdot S_z \quad (W) \quad (16)$$

Kde t_z je průměrná teplota vnitřního povrchu zdíva ($^{\circ}C$),

t_v - teplota okolního vzduchu ($^{\circ}C$),

α_k - součinitel přestupu tepla konvekcí na vnější straně zdíva ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$) podle zkušeností je $\alpha = 19,8 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$,

$\sum \frac{b}{\lambda}$ - součet tepelných odporů jednotlivých vrstev pecního zdíva ($m^{-2} \cdot K \cdot W^{-1}$),

S_z - plocha povrchu zdíva podle rov. (17) (m^2).

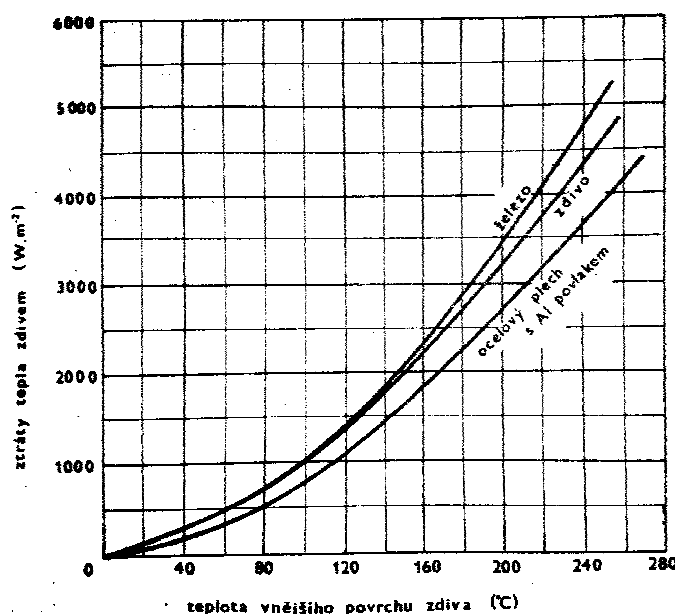
Je-li tloušťka stěn, klenby a půdy různá, určují se ztráty zdívm pro každou část zvlášť. Za povrch zdíva S_z se dosazuje u velkých pecí vnější povrch zdíva. U menších pecí a pecí se zaoblenými tvary se dosazuje střední hodnota povrchu zdíva $\overline{S_z}$, určená jako logaritmická nebo geometrická střední hodnota z rovnic:

$$\overline{S_z} = \frac{S_1 - S_2}{\ln \frac{S_1}{S_2}} \quad (m^2) \quad (17)$$

$$\overline{S_z} = \sqrt{S_1 \cdot S_2} \quad (\text{m}^2) \quad (18)$$

kde S_1, S_2 je vnější, vnitřní povrch zdiva (m^2).

Velmi snadno a rychle lze ztráty tepla zdivem a klenbami pecí odečíst ze zjednodušeného diagramu na obr. 11, známe-li vnější teplotu zdiva pece [14].



Obr. 11 Určení ztrát tepla zdivem pece na základě teploty vnějšího povrchu pecního zdiva.

U pecí pracujících s přetržitým provozem je stanovení ztráty tepla zdivem značně složitější, neboť teplotní pole ve zdivu je nestacionární. Ztráta tepla zdivem je v tomto případě určena odvodem tepla konvekcí z vnějšího povrchu zdiva do okolního prostředí a změnou akumulace ve zdivu, tedy:

$$Q_{zz} = Q_{k,zz} \pm Q_{ak} \quad (\text{W}) \quad (19)$$

kde $Q_{k,zz}$ je ztráta tepla konvekcí z vnějšího povrchu zdiva (W),
 Q_{ak} - změna akumulace tepla ve zdivu (W).

Ztráta tepla konvekcí z vnějšího povrchu zdiva do okolního prostředí $Q_{k,zz}$ se vypočte z rovnice:

$$Q_{k,zz} = \alpha_k \cdot (t_{pov} - t_{ok}) \quad (\text{W}) \quad (20)$$

Za teplotu povrchu t_{pov} se dosazuje střední hodnota povrchové teploty zdiva za příslušný časový úsek. Změna akumulace tepla Q_{ak} může ztráty tepla zdivem pece zvýšit (+) případně snížit (-). Zvyšuje-li se za příslušný časový úsek akumulované teplo ve zdivu, tak ztráta tepla zdivem se zvyšuje o hodnotu $+ Q_{ak}$. Snižuje-li se naopak akumulované teplo ve zdivu, tak ztráta tepla zdivem se snižuje o hodnotu $- Q_{ak}$.

$$\pm Q_{ak} = V_z \cdot \rho_z \cdot c_z \cdot \Delta \overline{t_z} \quad (\text{W}) \quad (21)$$

kde V_z je objem pecního zdiva (m^3),
 ρ_z - hustota zdiva ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$),
 c_z - měrná tepelná kapacita zdiva ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$),
 Δt_z - rozdíl středních teplot zdiva za příslušný časový úsek ($\text{K} \cdot \text{s}^{-1}$).

4.1.8.2 Ztráty tepla dveřmi, okny a štěrbinami

Dveřmi, okny a štěrbinami se může v některých případech ztrácet značné množství tepla (20 % i více), zejména u pecí s nezakrytými pracovními otvory. Tyto ztráty jsou v širokých mezích podle typu pece, rozměru oken a doby jejich odkrytí. Skládají se ze ztrát tepla sáláním a vyšleháváním spalin.

Ztráta tepla sáláním dvířky a štěrbinami Q_{zs} se stanovuje ze základního vztahu pro přenos tepla sáláním:

$$Q_{zs} = 5,67 \cdot \left(\frac{T_{pec}}{100} \right) \cdot S \cdot \tau \cdot \phi \quad (\text{W}) \quad (22)$$

kde S je plocha dvířek, štěrbin (m^2),
 T_{pec} - termodynamická teplota prostoru pece (K),
 τ - doba po kterou byla dvířka otevřena (s),
 ϕ - Součinitel zaclonění zachycující vliv rozměru dvířek, štěrbin a tloušťky pecní stěny.

Ztráta tepla vyšleháváním okny a štěrbinami Q_{zv} závisí na tlaku v pracovním prostoru pece a na rozměrech oken. Vlivem změn tlaku v peci se mění, proto se při běžném výpočtu tepelné bilance obvykle nepočítají. Přibližnou hodnotu těchto ztrát lze určit za předpokladu, že na půdě pece se tlak rovná tlaku atmosférickému, tedy:

$$Q_{zv} = V_0 \cdot c_p \cdot t_p \cdot \tau \quad (\text{W}) \quad (23)$$

kde V_0 je množství vyšlehávajících plynů ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$),
 $c_p \cdot t_p$ - entalpie vyšlehávaných plynů ($\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}$),
 τ - doba otevření oken, popř. doba vyšlehávání plamenů (s).

4.1.8.3 Ztráty tepla chladící vodou

U provozovaných pecí není určení ztrát tepla chladící vodou Q_v obtížné. Stačí určit hmotnost protékající chladící vody m_v ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$) a vstupní a výstupní hodnotu entalpií vody a dosadit do rovnice:

$$Q_v = m_v (i_v'' - i_v') \quad (\text{W}) \quad (24)$$

kde m_v je hmotnost protékající vody ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$),
 i_v'', i_v' - entalpie vstupní, výstupní vody ($\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}$).

4.1.8.4 Ztráty tepla ohřevem pohybujících se částí

Zejména u pecí s nepřetržitým provozem nastává pravidelný ohřev a ochlazování některých pohybujících se částí pece (pásky, vozíky dopravníky apod.). Ztráty tepla ohřevem těchto pohybujících se částí Q_{poh} lze stanovit ze vztahu:

$$Q_{poh} = m_{poh} (i''_{poh} - i'_{poh}) \quad (W) \quad (25)$$

kde m_{poh} je hmotnost pohybujících se částí pece (kg.s^{-1}),
 i''_{poh} , i'_{poh} - entalpie těchto částí na konci a počátku pece (kJ.kg^{-1}).

4.1.9 Ztráty tepla okujemi

Ztráty tepla okujemi Q_{ok} se určují z rovnice:

$$Q_{ok} = \frac{a \cdot \Psi}{100} \cdot G \cdot c_{ok} \cdot (t_{ok} - t_k) \quad (W) \quad (26)$$

kde a je opal kovu (%),
 c_{ok} - měrná tepelná kapacita okují (rovná se $1,05 \text{ kJ.kg}^{-1}$),
 G - množství vsazovaného kovu (kg.s^{-1}),
 Ψ - množství okují ($\Psi=1,38$),
 t_{ok} - teplota okují, která je rovna maximální teplotě kovu ($^{\circ}\text{C}$),
 t_k - počáteční teplota ohřívání kovu ($^{\circ}\text{C}$).

4.1.10 Ztráty zbývající

Mezi zbývající ztráty Q_{zb} počítáme ztráty vzniklé netěsnostmi zakrytých oken, netěsností zdíva pece, chybami, nepřesnosti měření a matematického výpočtu. Tyto ztráty se v některých případech odhadují až na 10 % ztrát tepla přivedeného palivem, tedy:

$$Q_{zb} = 0,1 \cdot B \cdot Q_n \quad (W) \quad (27)$$

4.2 Tepelná práce pecí

Pro posouzení základních parametrů tepelné práce pece se používají základní druhy účinností a různé ukazatele charakterizující tepelnou práci pece. Tepelné práce pecí určují jejich hospodárnost a konstrukční vlastnosti.

4.2.1 Ukazatele charakterizující tepelnou práci

V našich provozech se často používá pojem měrná spotřeba paliva B' , která je definována výrazem:

$$B' = \frac{B \cdot Q_n}{G} \quad (W) \quad (28)$$

kde G je výkon pece (kg.s^{-1}) nebo (t.s^{-1}),
 B - spotřeba paliva ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$) nebo (kg.s^{-1}),
 Q_n - výhřevnost paliva (kJ.m^{-3}) nebo (kJ.kg^{-1}).

Dalším ukazatelem práce je výkon pece G , udávaný v kilogramech nebo tunách ohřátého materiálu za časovou jednotku:

$$G = \frac{G_v}{\tau} \quad (\text{kg.s}^{-1}) \text{ nebo } (\text{t.s}^{-1}) \quad (29)$$

kde G_v je množství vsázky (kg),
 τ - doba tavy nebo ohřevu (s).

Při srovnávání výkonů různých pecí je vhodnější měrný výkon pece N , který určuje zatížení nístěje pece:

$$N = \frac{G}{S_{nís}} \quad (\text{kg} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}) \quad (30)$$

kde $S_{nís}$ je plocha nístěje pece (m^2).

4.2.2 Účinnosti pece

Pro dokonalé zachycení tepelné práce a stavu pece je vhodné sledovat především účinnost pece η , vyjadřující poměr množství užitečného předaného tepla k chemickému teplu paliva, tedy:

$$\eta = \frac{Q_u}{Q_{ch}} \cdot 100 \quad (\%) \quad (31)$$

Účinnost pece η je součinem dvou dílčích účinností, a to účinnosti topení η_t a účinnosti ohřevu η_o , tedy:

$$\eta = \eta_t \cdot \eta_o \quad (\%) \quad (32)$$

Účinnost topení η_t charakterizuje využití množství předaného tepla v pracovním prostoru pece vzhledem k teplu přivedenému palivem. Dává představu o velikosti ztrát tepla spaliny:

$$\eta_t = \frac{Q_{ch} - Q_s}{Q_{ch}} \cdot 100 \quad (\%) \quad (33)$$

Účinnost ohřevu η_o dovoluje posoudit ztráty tepla vlastního pracovního prostoru. Určuje, jaký díl tepla přivedeného paliva po odečtení ztrát spaliny přijímá kov. Matematický vztah pro tuto účinnost má tvar:

$$\eta_o = \frac{Q_u}{Q_{ch} - Q_s} \cdot 100 \quad (\%) \quad (34)$$

Pro vyjádření účinnosti regenerace tepla η_r (účinnosti výměníku) je vhodné zavést poměr tepla získaného předeřátím spalovacích složek k teplu přivedenému do výměníku spaliny pece:

$$\eta_r = \frac{Q_v + Q_p}{Q_s} \cdot 100 \quad (\%) \quad (35)$$

Pro oceňování vhodnosti paliv v uvažovaných provozních podmínkách se používá součinitel využití paliva η_{vp} , který je dán vztahem:

$$\eta_{vp} = \frac{Q_{ch} + Q_v + Q_p - Q_s}{Q_{ch}} \cdot 100 \quad (\%) \quad (36)$$

Součinitel využití paliva charakterizuje množství využitého paliva v pracovním prostoru pece a přímo zachycuje vliv přehřívání spalovacích složek.

4.3 Sestavení tepelné bilance žíhací vozové pece.

Druh pece:	komorová vozová žíhací pec
Rozměry nístěje:	šířka 4,4 m, délka 6 m
Vnější plocha zdiva:	118,56 m ²
Ohříváný materiál:	tyčová ocel Ø 52 mm o délce 5 m, svazky 1,5 – 2 tuny
Hmotnost vsázky:	30.170 kg
Druh materiálu:	uhlíková ocel (0,2 % C)
Doba ohřevu:	24,5 h, 88.200 s
Výkon pece:	0,342 kg.s ⁻¹
Palivo:	zemní plyn
Výhřevnost paliva:	34.383 kJ.m ⁻³
Příkon paliva:	1231,40 m ³ .h ⁻¹ , 01472 m ³ .s ⁻¹
Spalovací vzduch:	přehřát na 154 °C, $i_{vz}^{154^{\circ}C} = 205,50 \text{ kJ.m}^{-3}$
Konečná teplota ohříváního materiálu:	690 °C
Spaliny na výstupu z pece:	790 °C
Teplota materiálu při sázení:	20 °C
Zdivo pece na vnější straně:	125 °C
Poměr objemu plyn/spaliny:	1 : 11,497
Objem spalovacího vzduchu:	0,15440 m ³ .s ⁻¹
Objem CO ve spalínách:	zjištěno z analýz spalín, v nichž bylo 0,43 % CO
Opal materiálu:	0,5 %

4.3.1 Ukazatele charakterizující tepelnou práci žíhací pece

Výkon pece podle rovnice (29):

$$G = \frac{30.170}{24.5 \cdot 3600} = 0,342 \text{ kg.s}^{-1}$$

Měrná spotřeba tepla podle rovnice (28):

$$B' = \frac{0,01472 \cdot 34.393}{0,342} = 1,48 \text{ MJ.kg}^{-1}$$

Měrný výkon pece podle (30):

$$N = \frac{0,342}{4,4 \cdot 6} = 0,0129 \text{ kg.s}^{-1}.\text{m}^{-2}$$

4.3.2 Výpočet jednotlivých položek tepelné bilance žíhací pece

Chemické teplo paliva podle rovnice (7):

$$Q_{ch} = 0,01472 \cdot 34.393 = 506,265 \text{ kW}$$

Teplo předehřátého vzduchu podle (8):

$$Q_v = 0,15440 \cdot 205,5 = 31,730 \text{ kW}$$

Teplo exotermických reakcí podle (10):

$$Q_{ex} = \frac{5650 \cdot 1231,4 \cdot 0,5}{100 \cdot 3,6} = 9,663 \text{ kW}$$

Užitečné teplo potřebné k ohřevu kovu podle (11):

$$Q_u = 0,342 \cdot (436,08 - 9,58) = 145,863 \text{ kW}$$

Ztráty tepla spaliny podle rovnice (12):

$$Q_s = 0,01472 \cdot 11,497 \cdot 1183,12 = 200,226 \text{ kW}$$

Ztráty tepla nedokonalostí hoření podle rovnice (15):

$$Q_{ned} = \frac{3512 \cdot 0,01472 \cdot 11,497 \cdot 0,5}{100} = 2,555 \text{ kW}$$

Ztráty tepla zdivem pece podle (obr. 11):

$$Q_{zz} = 1400 \cdot 118,56 = 165,984 \text{ kW}$$

Ztráty tepla okujemi podle rovnice (26):

$$Q_{ok} = \frac{0,5 \cdot 1,38}{100} \cdot 0,342 \cdot 1,05 \cdot (690 - 20) = 1,660 \text{ kW}$$

Ztráty tepla zbývající podle rovnice (27):

$$Q_{zb} = 0,1 \cdot B \cdot Q_n = 0,1 \cdot Q_{ch}$$

$$Q_{zb} \leq 0,1 \cdot Q_{ch} \Rightarrow 0,1 \cdot 506,265 \quad Q_{zb} \leq 50,626 \text{ kW}$$

$$Q_{ch} + Q_v + Q_{ex} = Q_u + Q_s + Q_{ned} + Q_{zz} + Q_{ok} + Q_{zb}$$

$$506,265 + 31,730 + 9,663 = 145,863 + 200,226 + 2,555 + 165,984 + 1,660 + Q_{zb}$$

$$Q_{zb} = 547,658 - 516,288 = 31,370 \text{ kW}$$

4.3.3 Tepelná bilance pracovního prostoru žíhací pece

Tepelnou bilanci pracovního prostoru vozové žíhací pece určuje tabulka 1., kde na levé straně tabulky jsou položky příjmu tepla a na pravé položky výdeje.

Tab. 1 Tepelná bilance pracovního prostoru pece (bez rekuperátoru).

Přívod tepla	kW	%	Výdej tepla	kW	%
Q_{ch}	506,265	92,44	Q_u	145,863	26,63
Q_v	31,730	5,79	Q_s	200,226	36,56
Q_{ex}	9,663	1,77	Q_{ned}	2,555	0,46
			Q_{zz}	165,984	30,31
			Q_{ok}	1,660	0,30
			Q_{zb}	31,370	5,74
Součet položek přívodu tepla	547,658	100,00	Součet položek výdeje tepla	547,658	100,00

4.3.4 Účinnosti žíhací pece

Tepelně technickou stránku žíhací vozové pece objasní hodnoty jednotlivých účinností.

Účinnost pece bez předehřátého vzduchu podle rovnice (31):

$$\eta = \frac{145,863}{506,265} \cdot 100 = 28,81 \%$$

Účinnost topení podle rovnice (33):

$$\eta_t = \frac{506,265 - 200,226}{506,265} \cdot 100 = 60,45 \%$$

Účinnost ohřevu podle rovnice (34):

$$\eta_o = \frac{145,863}{506,265 - 200,226} \cdot 100 = 47,66 \%$$

Protože číselník v rovnici pro η_t se rovná jmenovateli v rovnici pro η_o , je $\eta = \eta_t \cdot \eta_o = 28,81 \%$.

Účinnost regenerace odpadního tepla spalín podle rovnice (35):

$$\eta_r = \frac{31,730}{200,226} \cdot 100 = 15,84 \%$$

Součinitel využití paliva podle rovnice (36):

$$\eta_{vp} = \frac{506,265 + 31,730 - 200,226}{506,265} \cdot 100 = 66,71 \%$$

5 EMISE A VLIV PROVOZU PECÍ NA ŽIVOTNÍ PROSTŘEDÍ

Pojmem emise je chápán vstup určité látky nebo skupiny látek do atmosféry. Atmosférou jsou pak tyto látky přenášeny od zdroje do přízemní vrstvy atmosféry, kde způsobují znečištění našeho životního prostředí. Jako látky znečišťující ovzduší označujeme hmotné látky, které buď přímo, nebo po fyzikální či chemické změně v atmosféře nepříznivým způsobem ovlivňují životní prostředí. Toto nepříznivé ovlivňování se může projevat škodami na zdraví lidí a zvířat, ale i na změnách přirozeného složení ovzduší. Znečišťující látky, které se vyskytují v přízemní vrstvě atmosféry a škodlivě působí na zdraví lidí, přírodu a hmotné statky, označujeme jako imise a ty, které dopadnou na zemský povrch, jako depozice [15]. Podle skupenství se látky znečišťující ovzduší dělí na tuhé, kapalné a plynné.

Charakter emisí z provozu pecí závisí zejména na druhu paliva, jímž je pec vytápěna a na dokonalosti spalování. Významný vliv má také technologický proces a typ pece, v němž spalování probíhá. Hutnické pece jsou vytápěny jak tuhými, tak i kapalnými a plynými palivy. Mezi nejpoužívanější tuhá paliva patří černé uhlí a koks, jež jsou určujícím palivem ve vysokopecním průmyslu a v kuplovnách. Z kapalných paliv se využívají zejména frakční destilací ropy vyráběné topné oleje. Pro své příznivé vlastnosti v dopravě a v technologii spalovacího procesu se v hutnictví používají plyná paliva jak přírodní (zemní plyn), tak uměla, která vznikají jako součást hutní výroby (vysokopecní, koksárenský plyn), nebo se vyrábí samostatnou technologií (generátorový plyn), případně se dováží (svítiplyn, štěpný plyn).

5.1 Tuhé a kapalné znečišťující látky

Tento druh znečištění je vytvářen částicemi tuhých a kapalných látek ve značném velikostním spektru od makromolekul až po viditelná zrna. Složení těchto částic je velmi rozmanité a zahrnuje celou škálu anorganických i organických látek. Kapalně částice rozptýlené v ovzduší vznikají kondenzací plynné fáze nebo rozrušením většího objemu tekutiny. Vlastnosti kapalných částic se hodnotí obdobně jako vlastnosti částic tuhých. Tyto látky mají schopnost vytvářet se vzduchem dvojfázové disperzní systémy. Vzduch je pak disperzním prostředím a tuhé a kapalné částice dispergovanou látkou. Podle stability disperzního systému dělíme tyto látky na prachy a aerosoly.

- prach označuje malé částice tuhých látek, které po rozptýlení v klidném disperzním systému mají pádovou rychlost. Tato rychlost odpovídá zákonům volného pádu.
- aerosol pak zahrnuje tuhé a kapalné částice, které po rozptýlení v klidném disperzním prostředí vytvářejí stabilní systém.

Vliv prachových a aerosolových částic v ovzduší na lidské zdraví závisí především na velikosti částic. Větší částice pro svou hmotnost poměrně rychle sedimentují, proto mají relativně malý přímý zdravotní význam. Daleko závažnější však je účinek jemnějších částic. Druh vznikajících částic je u tepelných procesů přímo ovlivněn spalováním určitého druhu paliva, či konkrétní technologie, které jsou zdrojem emisí. Z hlediska ukládání částic aerosolu v plicích jsou nejnebezpečnější částice střední velikosti, protože jsou až z 90 % zachycovány v plicích.

5.2 Plynné znečišťující látky

Plyny a páry znečišťujících látek se do ovzduší dostávají jak ze zdrojů přírodních, tak i jako výsledek lidské činnosti, a to především se zplodinami spalování paliv či z průmyslových technologií. Mezi hlavní plynné znečišťující látky vzniklé při spalování a zpracování paliv patří některé sloučeniny síry a dusíku, oxid uhelnatý a uhličitý, metan a další uhlovodíky všech typů.

5.2.1 Sloučeniny síry

Oxid siřičitý SO_2 , je vedle aerosolových částic nejrozšířenější látkou znečišťující volné ovzduší. Jediným jeho přírodním zdrojem je vulkanická činnost. Hlavními jeho zdroji jsou však především elektrárny a teplárny, spalující palivo s vysokým obsahem síry (cca 80 % všech emisí SO_2), ale také domácí topeniště a některé technologické procesy (metalurgie a chemický průmysl). V celosvětovém měřítku jsou emise SO_2 odhadovány na 190 milionů tun ročně. Přední místo mezi producenty SO_2 zaujímá i Česká republika v důsledku využívání nízkovýhřevných nekvalitních paliv s vysokým obsahem síry pro energetické účely. Oxid siřičitý nezůstává v atmosféře beze změn, ale jeho koncentrace rychle klesá, zejména následkem oxidace na oxid sírový. Ten však za přítomnosti vodní páry okamžitě hydratuje za vzniku kyseliny sírové. Při nedostatku alkalických částic v ovzduší dochází k okyselení srážkových vod až na $\text{pH} < 4,0$. Kyselé deště uvolňují z půdy hliníkové a jiné kovové ionty, které dále poškozují půdní mikroorganismy, znehodnocují vodu a způsobují úhyn ryb. Oxid siřičitý je vzhledem ke svým vlastnostem dráždivý plyn. Negativně působí na zdraví živočichů i lidí. Poškozuje především dýchací cesty a oční spojivky. Dlouhodobé působení SO_2 při koncentracích nad $50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ vede ke zvýšení úmrtnosti na choroby krevního oběhu a chronickou bronchitidu. Ve velmi malých koncentracích negativně působí rovněž na rostlinstvo. Jedny z nejcitlivějších jsou lišejníky, které rychle hynou.

Oxid sírový SO_3 , vzniká v ovzduší v důsledku oxidace přítomného oxidu siřičitého. V menším množství (1 – 2 %) vzniká přímo při spalovacích reakcích vedle oxidu siřičitého. Oxid sírový reaguje prakticky okamžitě se vzdušnou vlhkostí za vzniku aerosolu kyseliny sírové, který má velmi nepříznivé účinky na lidské zdraví.

Sulfan H_2S , je důležitým článkem řetězce koloběhu síry v přírodě. K jeho hlavním přírodním zdrojům patří anaerobní činnost bakterií v půdě, bažinách a přílivových oblastech oceánů. Dále vulkanická činnost a únik ropy a zemního plynu. Zdroje, u nichž dochází k tvorbě sulfanu v důsledku lidské činnosti, jsou stejné jako u oxidu siřičitého. Především spalování fosilních paliv s obsahem síry a některá průmyslová odvětví.

5.2.2 Sloučeniny dusíku

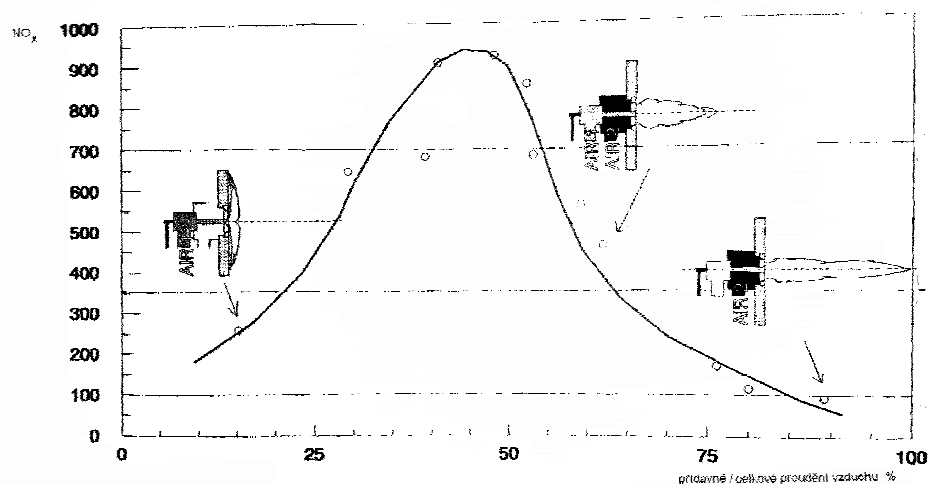
Dusík je hlavní součástí ovzduší (78,08 %). Kromě molekulárního dusíku jsou v atmosféře obsaženy i četné jeho sloučeniny. Mnohé z nich je možno považovat za látky znečišťující. Z hlediska škodlivého vlivu na životní prostředí je v ovzduší nejvýznamnější výskyt oxidu dusnatého NO a oxidu dusičitého NO_2 (dráždivý, rezavě zbarvený plyn). Vzhledem k tomu, že většina analytických metod udává sumu těchto oxidů, obvykle se tyto dva oxidy shrnují pod společný název suma oxidů dusíku a označuje se jako NO_x .

Přírodními zdroji NO_x je zejména činnost bakterií, vulkanická činnost a elektrické výboje v atmosféře. Značná část NO_x pochází ze spalovacích procesů, z dopravy, případně z chemických výrob. Produkce NO_x je tak soustředěna do průmyslových center a velkých městských aglomerací, kde koncentrace NO_x značně převyšuje hodnotu ve volné krajině. Při vysokých teplotách, za nichž probíhají reakce spalování fosilních paliv, vzniká především

NO, který je ve směsi NO_x zastoupen z 90 až 95 objemových procent. Množství tvorby NO_x je tím větší, čím je vyšší spalovací teplota, čím je větší poměr vzduchu (přebytek vzduchu) a čím je delší doba držení spalin v pásmu spalné teploty (ve spalovacím prostoru). Jejich množství závisí na druhu paliva a druhu spalovacího zařízení [16]. Obsah NO_x ve spalinách se proto pohybuje ve velmi širokém rozmezí podle uvedených teplot spalování. Na obr. 12 je uveden graf množství vzniklých emisí NO_x vzhledem k nastavení spalovacího zařízení. Rozhodující vliv u spalovacích zařízení má tedy teplota hoření. Snížení maximální teploty plamene v zóně spalování značně snižuje tvorbu emisí NO_x . Pro snížení teploty plamene bylo vyvinuto devět alternativ:

- minimalizace pracovních teplot
- přechody na jiná paliva
- nízký přebytek vzduchu
- recirkulace spalin
- spalování chudých směsí
- postupné spalování
- hořáky s nízkou produkcí NO_x
- sekundární spalování
- vstřikování vodní páry

Nízký přebytek vzduchu a recirkulace spalin pracuje na principu snížení koncentrace kyslíku, která způsobuje nižší teplotu plamene [17]. Na rozdíl u spalování chudých směsí, kde je dodatečný vzduch přiváděn na ochlazení plamene. U postupného spalování a hořáků s nízkou produkcí NO_x probíhá počáteční spalování v zóně bohaté na palivo, pak následuje vstřikování vzduchu po proudu z primární spalovací zóny. Spalováním po proudu je dosaženo spalování chudé směsi při nižší teplotě. Postupné spalování se skládá z části vstřikování paliva a spalovacího vzduchu v primární spalovací zóně.



Obr. 12 Množství vzniklých emisí NO_x podle nastavení spalovacího zařízení.

Ze zdravotního hlediska působí oxidy dusíku NO_x nepříznivě zejména na dýchací orgány, kde mohou vést k jejich onemocnění, případně i ke vzniku onemocnění nádorových. Při vyšších koncentracích se váže na hemoglobin a zhoršuje přenos kyslíku z plic do krevního oběhu.

5.2.3 Sloučeniny uhlíku

Uhlík je v atmosféře přítomen jednak jako oxid uhličitý a uhelnatý, jednak ve formě četných organických sloučenin. Jde zejména o metan a další uhlovodíky. Významný vliv na životní prostředí mají i látky organické, především polycyklické aromatické uhlovodíky.

Oxid uhelnatý CO, je bezbarvý plyn, vznikající při nedokonalém spalování hořlavých látek. Jeho hlavními přírodními zdroji jsou vulkanické a bahenní plyny a lesní požáry. Významným zdrojem jsou také fotochemické reakce v atmosféře, při nichž vzniká CO a CO₂. Vlivem lidské činnosti je to zejména spalování paliv při výrobě energie. Odhaduje se, že zdroje přírodního původu jsou co do produkce rovnocenné zdrojům z lidské činnosti. Obsah CO v atmosféře je díky jeho účinným mechanismům odstraňování pravděpodobně stálý již po několik století. V ovzduší CO přechází fotochemickou oxidací na oxid uhličitý. Tato reakce probíhá pomalu, v řádu několika měsíců. Při vdechování se oxid uhelnatý váže místo kyslíku na krevní barvivo hemoglobin a blokuje tak jeho funkci. Je tedy silně toxický.

Oxid uhličitý CO₂, je bezbarvý plyn s výraznou radiační absorpcí v infračervené oblasti. Vzniká v přírodě jako produkt dýchání, vulkanickou činností či rozkladem organických látek. Díky lidské činnosti vzniká při spalování uhlikatých paliv. Tento příspěvek lidské činnosti představuje v současné době asi 4 % z celkového množství CO₂, jenž vstupuje do ovzduší. Jeho současný obsah v ovzduší je 0,03 až 0,04 % objemových. Z hlediska biochemického patří oxid uhličitý mezi nejvýznamnější atmosférické plyny. Významná je jeho funkce při dýchání všech živých organismů a při fotosyntéze v rostlinách. Oxid uhličitý nepodléhá v troposféře žádným chemickým reakcím a setrvává v ní několik let. Z atmosféry je odbouráván až ve stratosféře, kde začíná proces fotolýzy CO₂.

Oxid uhličitý není znečišťující složkou v ovzduší. V souvislosti s jeho stoupajícím obsahem v atmosféře v důsledku zvýšeného spalování fosilních paliv je však v současnosti tomuto plynu připisován negativní vliv. Tento negativní vliv je zejména v souvislosti s tzv. skleníkovým efektem. Tento skleníkový efekt spočívá v oteplování země v důsledku omezení tepelné radiace Země adsorpcí infračerveného záření.

5.2.4 Polycyklické aromatické uhlovodíky (PAU)

Představují velmi důležitou skupinu organických látek vyskytujících se ve znečištěném ovzduší. Polycyklické aromatické uhlovodíky patří v současné době mezi velmi rozšířené a vzhledem ke svým karcinogenním vlastnostem mezi velmi obávané a sledované znečišťující látky. Ke znečištění dochází zejména v oblastech, kde se nachází emise produktů nedokonalého spalování. Jedná se hlavně o spalování tuhých paliv v některých průmyslových technologiích. Při ochlazování kouřových plynů tyto látky kondenzují na sazích a jiných pevných nosičích a unikají do atmosféry. PAU jsou látky poměrně stabilní. Rychlost jejich rozkladu v ovzduší je ovlivňována nosičem, na který jsou sorbovány. Pouze u některých PAU byly prokázány v různé míře karcinogenní účinky. Nejsilnější účinky má benzo(a)pyren, který bývá nejčastěji stanovován.

5.3 Limity znečišťování ovzduší

Aby bylo možné porovnávat míru znečišťování a hodnotit míru již znečištěného ovzduší, byly stanoveny referenční hodnoty pro emise a imise. Tyto referenční hodnoty jsou po nabytí právního charakteru nazývány limity. Limity pro emise jsou stanoveny s ohledem na technologickou úroveň dané technologie a samozřejmě musí brát ohled na lokální hustotu průmyslu v dané oblasti. Podle současné legislativy rozeznáváme tři limity.

5.3.1 Emisní limity

Nejvyšší úroveň znečišťování ovzduší určují dle stávající legislativy emisní limity pro jednotlivé znečišťující látky. Emisní limit je nejvýše přípustné množství znečišťující látky vypouštěné ze zdroje znečišťování do ovzduší. Přípustnou úroveň znečišťování ovzduší určují hodnoty emisních limitů pro jednotlivé znečišťující látky nebo jejich stanovené skupiny. Emisní limity pro stacionární zdroje se člení na obecné emisní limity a emisní limity specifické.

Specifické emisní limity jsou jmenovitě stanoveny (vyhláškou Ministerstva životního prostředí) navíc u nebezpečných zdrojů se zvýšeným nebezpečím pro okolí, a to s ohledem na množství emisí nebo jejich zvýšenou škodlivost. Pokud tyto technologie nejsou v seznamu této vyhlášky, pak pro ně platí obecné emisní limity.

Obecné emisní limity jsou stanoveny pro 141 znečišťujících látek. Tyto obecné emisní limity pro základní znečišťující látky (SO_2 , NO_x , CO) mají v současnosti následující hodnoty:

- Oxid siřičitý: při hmotnostním toku oxidu siřičitého vyšším než 20 kg/h nesmí hmotnostní koncentrace SO_2 překročit hodnotu 2500 mg/m^3 .
- Oxidy dusíku: při hmotnostním toku oxidů dusíku vyšším než 10 kg/h nesmí hmotnostní koncentrace oxidů dusíku (vyjadřují se jako NO_2) v nosném plynu překročit hodnotu 500 mg/m^3 .
- Oxid uhelnatý: při hmotnostním toku oxidu uhelnatého vyšším než 5 kg/h nesmí hmotnostní koncentrace oxidu uhelnatého v nosném plynu překročit hodnotu 800 mg/m^3 .

Obecné emisní limity pro znečišťující látky jsou uvedeny ve vyhlášce MŽP ČR č. 117/1997 Sb. Ve znění vyhlášky č. 97/2000 Sb.

5.3.2 Imisní limity

Znečišťující látky, které škodí zdraví, se v hygienickém pojetí nazývají škodlivinami. Míru škodlivosti nebo nebezpečnosti různých znečišťujících látek z hlediska receptorů lze vyjádřit poměrem zákonných norem kvality ovzduší – imisních limitů, jimiž jsou obvykle nejvyšší přípustné koncentrace (NPK) znečišťujících látek v ovzduší. Pro jednu znečišťující látku mohou být imisní limity různé z hlediska lidí, zvířat, rostlin nebo ekosystémů. Běžně se imisní limity určují z hlediska lidského zdraví. Hodnotami imisních limitů se tedy stanovují úrovně znečištění ovzduší. Hodnoty imisních limitů jsou vyjádřeny v $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ a jsou vztaženy na standardní podmínky (0°C a $101,325 \text{ kPa}$). Imisní limity jsou vyhodnocovány jako 1 hodinové, 24 hodinové nebo za celý kalendářní rok.

5.3.3 Depoziční limity

Při hodnocení kvality ovzduší vzhledem k množství poléťavého prachu se používá i vyhodnocení spádu prachu (depozice). Množství spádu prachu se obvykle vyjadřuje v $\text{t}\cdot\text{km}^{-2}$ nebo v $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$ za rok. Únosná hodnota spádu prachu je většinou v průmyslových oblastech, zejména v okolí průmyslových podniků, značně převýšena. Depoziční limit tedy vyjadřuje množství znečišťující látky dopadlé obvykle na 1 m^2 povrchu zemského.

6 ZÁVĚR

Předložená práce pojednává o žíhání, jako druhu tepelného zpracování oceli, jenž má v hutnictví, strojírenství a jiných technických oborech velký význam. Pro jednotlivé procesy žíhání je velmi důležitá žíhací pec, která musí zaručit dokonalý ohřev a ochlazování žíhaného materiálu. Teplota materiálu by měla být po celém jeho průřezu stejná, aby došlo k požadovaným změnám a nedocházelo k nežádoucímu pnutí.

Důležitým porovnávacím parametrem každé žíhací pece je topný systém a pecní atmosféra umožňující tvorbu a přestup tepla na ohřívaný materiál. Druh topného zařízení předurčuje nejen vlastnosti vyžíhaného kovu, ale i vliv jednotlivých druhů pecí na životní prostředí. Pece používající hořáky spalující plynná a kapalná paliva produkují mnoho škodlivých látek, jež jsou vypouštěny do ovzduší a nepříznivě působí na lidi, zvířata, rostliny i hmotné věci. Pravidelná kontrola množství emisi vypouštěných do ovzduší je tedy nezbytně nutná. Elektricky vytápěné pece tyto škodliviny neprodukují, jejich provoz je k životnímu prostředí šetrný. Použití ochranných atmosfér v prostoru pecí vyžaduje dokonalé utěsnění pece a přídatné náklady na vyvíječe atmosfér. Takto vyžíhaný materiál pak ale vykazuje jakostnější povahu a návratnost těchto přídatných investic je jen krátkodobá. Podrobněji se práce zabývá výpočtem tepelné bilance vozové žíhací pece bez rekuperátoru. Z tepelné bilance je zřejmé, že účinnost vozových pecí je menší a velké množství tepla odchází z prostoru pece spalinami. Použití výměníku tepla pro případný přehřev vzduchu nebo paliva je předností. Ke komplexnímu hodnocení tepelné práce žíhacích pecí je nezbytné pravidelně sestavovat tepelné bilance a vypočítávat charakteristické ukazatele, které usnadňují zhodnotit správnost nastavení a funkčnost daného zařízení.

S rostoucími cenami energií a narůstající spotřebou je potřeba zavádět úsporná řešení, která budou zároveň ohleduplná k životnímu prostředí. Elektrické pece se jeví jako alternativní řešení. Elektrická energie se však musí vyrábět ne vždy ekologicky a je dražší. Z energetického a ekologického hlediska je pro své příznivé vlastnosti nejideálnějším palivem do pecí zemní plyn, jehož spalování má ze všech paliv používaných v současnosti nejšetrnější vliv na životní prostředí.

Seznam použité literatury

- [1] MORÁVEK, O., BABOROVSKÝ, V. *Základy tepelného zpracování oceli*. 3. vyd. Praha: SNTL, 1969. s. 40 - 45. 04-215-69.
- [2] MARCOL J. *Tažený ocelový drát*. 2. díl. ŽDB, Bohumín, 1996, s. 26-36.
- [3] TEINDL, J. *Základy tepelného zpracování kovů*. 2. vyd. Ostrava: VŠB v Ostravě, 1968. s. 131-159.
- [4] JECH, J. *Tepelné zpracování oceli- metalografická příručka*. Praha: SNTL, 1969. s. 52 - 60. 04-410-69.
- [5] RÉDR, M. *Tepelné hospodářství hutí*. 1. vyd. Ostrava: VŠB v Ostravě, 1991. s. 8 - 11. ISBN 80-7078-097-5.
- [6] TEINDL, J. *Ochranné atmosféry v hutnictví a strojírenství*. Praha: SNTL, 1967. s. 13 - 46, s. 110 - 138 04-412-67.
- [7] VAUGHAN, C. H. *Types of Furnace Atmospheres*. Steel processing 43, 1953. s. 96 - 103.
- [8] HERČÍK, M. *Životní prostředí. Základy environmentalistiky*. VŠB TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA, 2006. s. 83 - 86. ISBN 80-248-1073-5.
- [9] NUTIL, J., ČECH, V. *Měření v hutním průmyslu*. Praha: SNTL, 1982. s. 292 - 308 04-409-82.
- [10] PŘÍHODA, M., HAŠEK, P. *Hutnické pece*. 1. vyd. Ostrava: VŠB v Ostravě, 1983. s. 362 - 372, s. 342 - 345.
- [11] KREMER, R., OBROUČKA, K. *Ohřev kovů*. Praha : SNTL, 1974. s. 269 - 274.
- [12] KREMER, R., KLIKA, R. *Tepelná technika*. Praha : SNTL, 1970. s. 338 - 359. 04-401-7.
- [13] RÉDR, M. *Tepelné hospodářství hutí II*. 2. vyd. Ostrava: VŠB v Ostravě, 1983. s. 425 - 441.
- [14] BÁLEK, S. *Tepelně technické tabulky a diagramy*. 2. vyd. Ostrava: VŠB v Ostravě, 2005. s. 93, ISBN 80-248-0828-5.
- [15] HERČÍK, M., FIEDOR, J., aj. *Legislativa a ochrana životního prostředí*. Ostrava: VŠB v Ostravě, 2008. s. 30 - 50. ISBN 978-80-248-1873-5.
- [16] CARVALHO, M. *Combustion Technologies for a Clean environment*. Abington, Gordon and Breach, 2004. s. 21-30, ISBN 2-88124-619-2.
- [17] DAVIS, M. L., CORNWELL, D. A. *Environmental Engineering* 3. vyd. WCB/McGraw-Hill, 1998. s. 524 - 525. ISBN 0-07-015918-1.

Seznam obrázků

- Obrázek 1 - Typický teplotní průběh při žíhání oceli
Obrázek 2 - Rovnovážný diagram železa a uhlíku
Obrázek 3 - Oblasti žíhacích teplot v rovnovážném diagramu Fe - Fe₃C
Obrázek 4 - Vyvíječ endotermického plynu
Obrázek 5 - Komorová pec s výjezdovou nístějí pro tepelné zpracování
Obrázek 6 - Vícesmyčkový a jednosmyčkový rekuperátor
Obrázek 7 - Poklopové pece s okrouhlými poklopy
Obrázek 8 - Provedení sálavých trubek
Obrázek 9 - Cirkulace řízené atmosféry pod ochranným poklopem během žíhání
Obrázek 10 - Příčný řez ohřívací pecí pro lesklé žíhání pásů
Obrázek 11 - Určení ztrát tepla zdivem pece na základě teploty vnějšího povrchu pecního zdiva.
Obrázek 12 - Množství vzniklých emisí NO_x podle nastavení spalovacího zařízení.